

# Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 178

**bast**

# Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

von

Frank Weise  
Götz Hüsken

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Berlin

unter Mitarbeit von

Marianne Niedack-Nad

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 178**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 29.0257**  
Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch  
nach AL Sp-Beton

**Fachbetreuung**  
Marko Wieland  
Christoph Becker

**Referat**  
Betonbauweisen

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-688-7

Bergisch Gladbach, April 2022

## Kurzfassung – Abstract

### Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Für die rechnerische Dimensionierung der Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen für den Neubau sowie die Erneuerung nach RDO-Beton 09 ist die statische Spaltzugfestigkeit an der unteren und oberen Bohrkernscheibe entsprechend der Vorgaben der AL Sp-Beton zu bestimmen. Aufgrund der unzureichenden Kenntnis der Präzision dieses Prüfverfahrens wurden, basierend auf dem Entwurf des FGSV-Merkblatts zur statistischen Auswertung von Prüfergebnissen, mit einem breit aufgestellten Ringversuch die statistischen Kennwerte an Labor- und Bestandsbetonen unter Vergleich- und Wiederholbedingungen ermittelt. Zur möglichst guten statistischen Absicherung nahmen an dem Ringversuch dreizehn erfahrene Prüfstellen teil, die vorab einem Audit unterzogen wurden. Zur Abdeckung des vielschichtigen Einsatzes des Prüfverfahrens erfolgte der Ringversuch an acht Prüflösen, die sowohl die Erst-/ Eignungsprüfung und Übereinstimmungskontrolle bei Neubaumaßnahmen, als auch die Restsubstanzbewertung von Betonfahrbahnplatten berücksichtigen. Zur Bewertung des Materialeinflusses wurde zusätzlich ein Prüflös mit Labormörtel untersucht.

Die Probenvorbereitung erfolgte zentral an der BAM. Zur Sicherstellung einheitlicher Prüfbedingungen bei den Prüfstellen wurde zusätzlich eine detaillierte Standardarbeitsanweisung erarbeitet, die partiell bereits Eingang in das Normenwerk gefunden hat. Bei der Plausibilitätsprüfung aller prüflösenspezifischen Einzelwerte der Spaltzug- und Druckfestigkeit wurden vereinzelt sowohl Ausführungsfehler als auch Übertragungs- und Tippfehler festgestellt. Der sich anschließende Lilliefors-Test zeigt, dass die ermittelten Einzelwerte bis auf wenige Ausnahmen normalverteilt sind und damit die Voraussetzungen für die statistische Auswertung gegeben sind.

Mittels grafischer Darstellung der Mandel's h- und k-Werte wurden die Auffälligkeiten hinsichtlich der Mittelwerte und Varianzen prüflösenspezifisch für die einzelnen Prüfstellen visualisiert und anschließend einige von ihnen mittels Grubbs- und Cochran-Test als Ausreißer identifiziert. Nach Ausreißereliminierung wurde mit dem klassischen Verfahren bei der Spaltzugfestigkeit der geringste Variationskoeffizient unter Vergleich- und Wiederholbedingungen bei der Erst-/Eignungsprüfung mit 6,2 und 6,4 % ermittelt. Bei einer Verminderung des Materialeinflusses durch die Verwendung eines Labormörtels verbessern sich die statistischen Kennwerte auf 4,5 und 5,3 %. Mit 8,2 und 9,5 % bzw. 8,6 und 9,5

% werden bei der Restsubstanzbewertung von Wasch- und Unterbetonen die höchsten Werte bestimmt.

Das robuste Auswerteverfahren (ohne Eliminierung der Ausreißer) nach dem Entwurf des FGSV-Merkblatts zur statistischen Auswertung von Prüfergebnissen erwies sich in der Form als ungeeignet und bedurfte einer Überarbeitung. Bezüglich der vergleichend mit klassischen und robusten Verfahren gewonnenen Kennwerte ist festzustellen, dass bei sehr homogenen Messergebnissen eines Prüflöses beide Verfahren nahezu die gleichen statistischen Kennwerte liefern. Bei der Eliminierung von Ausreißern sind die Ergebnisse des robusten Verfahrens in der Regel etwas größer als die des klassischen Verfahrens.

Die begleitenden vertiefenden Untersuchungen bei der Spaltzugprüfung mit innovativen Prüftechniken lieferten wertvolle Erkenntnisse zur Bewertung der Prüfeinflüsse.

### Round robin test for the static splitting tensile strength test according to AL Sp-Beton

The computational design of concrete pavements according to the requirements of the RDO-Beton 09 requires the splitting tensile strength to be determined according to specifications of the AL Sp-Beton. However, detailed information on the precision of the described test procedure is missing. Therefore, a round robin test was set up in order to determine the statistical parameters of the prescribed splitting tensile strength test on laboratory concrete and cores extracted from concrete pavements in terms of repeatability and reproducibility. 13 testing institutes have been involved in the round robin test to guarantee a representative coverage of the sector. The selected testing institutes have been audited prior the round robin test in order to ensure their capabilities. The round robin test was divided into 8 testing lots for covering the broad field of possible applications. Thereby, the testing lots cover both the initial testing of concrete and quality control of new construction. The latter case implies also the assessment of existing concrete pavements. Additionally, a cementitious mortar was designed in order to consider the influence of the material, such as maximum grain size, on the test procedure.

The samples were prepared at BAM to guarantee a uniform sample preparation. Furthermore, a standard operating procedure was prepared to assure constant test conditions at the testing institutes. This standard operating procedure is already

partly considered by the corresponding standard. A revision of the data reported by the testing institutes revealed that execution errors, transcription errors as well as typing errors occurred. However, a Lilliefors-Test was conducted to verify the Gaussian distribution of the reported test data and to allow the further statistical analysis. Only view data sets do not follow a Gaussian distribution, has no remarkable influence on the obtained statistical data.

By means of the graphical illustration of Mandel's h- and k-values, abnormalities of the arithmetic mean and variance are depicted. These apparent abnormalities can be identified as outliers using the Grubbs and Cochran test. After eliminating the identified outliers, the corresponding statistical parameters have been determined using the classical method for data analysis. The lowest coefficient of variation that was determined for the splitting tensile strength by using the classical method for assessment of the repeatability and reproducibility of the test procedure amounts to 6.2 and 6.4%, respectively, for the initial testing of concrete. Reducing the material influence by using a cementitious mortar, the corresponding statistical parameters were reduced to 4.5 and 5.3%. On the contrary, the highest statistical values were obtained for the assessment of existing concrete pavements. Here, values of 8.2 and 9.5% were obtained for the exposed aggregate concrete and 8.6 and 9.5% for the subconcrete, respectively.

The robust method for data analysis (without elimination of outliers) according to the draft version of the technical bulletin of the FGSV turned out to be inappropriate and required, therefore, a revision. Comparing the statistical parameters obtained by the classical and robust method used for data analysis it can be stated that both methods result in nearly identical values for homogeneous data sets without outliers. Considering outliers in the existing data sets, the statistical parameters obtained by the robust method are slightly higher than the values obtained by the classical method with elimination of outliers.

The additional investigations on the splitting tensile strength using innovative test procedures provided valuable findings for the assessment of test results.

## Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen

AL Sp-Beton	Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Einganggröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BR	Blickrichtung
BV	Betonverflüssiger
DF	Druckfestigkeit
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrsflächen e.V.
FM	Fließmittel
HGT	Hydraulisch gebundene Tragschicht
KI	Kies
KMD	Kraftmessdose
LP	Luftporenbildner
OB	Oberbeton
RDO	Richtlinie für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen
RStO	Richtlinie für die Standardisierung von Verkehrsflächen
SA	Sand
SEA	Schallemissionsanalyse
SP	Splitt
SÜL	Südumfahrung Leipzig
SZ	Spaltzug
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen
UB	Unterbeton
WB	Waschbeton

### Formelzeichen

$f_{ctk,core}$	charakt. Spaltzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,core}$	Mittelwert d. Spaltzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ct(i),core}$	Einzelwert d. Spaltzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{c,dry}$	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
D	Durchmesser [mm]
MW	Mittelwert
s	Standardabweichung
w/z	Wassermenge

## Inhalt

<b>1 Einleitung</b>	<b>8</b>	6.3.1 Grundlagen	28
<b>2 Zielsetzung und Abgrenzung</b>	<b>9</b>	6.3.2 Spaltzugfestigkeit	29
2.1 Forschungsziel	9	6.3.3 Druckfestigkeit	37
2.2 Abgrenzung	9	6.4 Identifikation von Ausreißern	41
2.3 Vorgehensweise	9	6.4.1 Grundlagen	41
<b>3 Grundlagen</b>	<b>11</b>	6.4.2 Ergebnisse	41
<b>4 Prüfstellen</b>	<b>12</b>	6.5 Statistische Kennwerte	42
4.1 Auswahl der Prüfstellen	12	6.5.1 Grundlagen	42
4.2 Ergebnisse des Laboraudits	12	6.5.2 Ergebnisse	43
4.2.1 Verwendete Prüfvorrichtungen	12	<b>7 Statistische Auswertung der</b>	
4.2.2 Prüfstellenspezifische Merkmale	14	<b>Prüfergebnisse nach robustem Verfahren</b>	<b>50</b>
<b>5 Probekörper und Versuchsvorgaben</b>	<b>17</b>	7.1 Vorgehensweise	50
5.1 Laborbeton	17	7.2 Statistische Kennwerte	51
5.1.1 Betonzusammensetzung	17	7.2.1 Mittelwerte der Spaltzug- und	
5.1.2 Frisch- und Festbetonkennwerte	17	Druckfestigkeit	51
5.1.3 Probekörperherstellung	18	7.2.2 Standardabweichung und	
5.2 Versuchsplatte	18	Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit	53
5.2.1 Plattenherstellung	19	7.2.3 Standardabweichung und	
5.2.2 Bohrkernentnahme	19	Variationskoeffizient der Druckfestigkeit	56
5.3 Bestandsbeton	20	7.3 Zusammenfassung	57
5.3.1 Entnahmestellen	20	<b>8 Prüfung der Ergebnisse auf</b>	
5.3.2 Betonzusammensetzung	20	<b>Normalverteilung</b>	<b>58</b>
5.3.3 Bohrkernentnahme	21	8.1 Grundlagen	58
5.4 Mörtelproben	23	8.2 Ergebnisse	58
5.4.1 Mörtelzusammensetzung	23	8.2.1 Spaltzugfestigkeit	58
5.4.2 Frischmörtelkennwerte	23	8.2.2 Druckfestigkeit	59
5.4.3 Probekörperherstellung	24	<b>9 Ermittlung der charakteristischen</b>	
5.5 Probekörpervorbereitung	24	<b>Spaltzugfestigkeit</b>	<b>61</b>
5.5.1 Herstellung der Probekörper	24	9.1 Grundlagen	61
5.5.2 Lagerung und Versand	24	9.2 Ergebnisse	61
5.5.3 Zulosung der Probekörper	25	<b>10 Begleitende Untersuchungen</b>	<b>63</b>
5.6 Standardarbeitsanweisung	25	10.1 Untersuchungsprogramm	63
5.6.1 Vorbereitende Arbeiten	25	10.1.1 Probekörper	63
5.6.2 Lagerung der Proben	25	10.1.2 Modifikation des Versuchsaufbaus	63
5.6.3 Anforderungen an zu verwendende		10.1.3 Hochgeschwindigkeitskamera	63
Prüfmittel und Geräte	25	10.1.4 Photogrammetrische	
5.6.4 Durchführung der Prüfung	26	Verformungsanalyse	64
5.6.5 Aufzeichnungen / Rohdaten	26	10.1.5 Querdehnungsmessung	64
5.6.6 Angaben zur Messunsicherheit	26	10.1.6 Schallemissionsanalyse	64
<b>6 Statistische Auswertung der</b>		10.1.7 Ultraschallgeschwindigkeit	65
<b>Prüfergebnisse nach klassischem</b>		10.2 Analyse des Bruchverhaltens	66
<b>Verfahren</b>	<b>27</b>	10.2.1 Versagensmechanismen	66
6.1 Vorgehensweise	27	10.2.2 Hochgeschwindigkeitskamera	67
6.2 Plausibilitätsprüfung der übermittelten		10.2.3 Photogrammetrische	
Prüfergebnisse	27	Verformungsanalyse	67
6.3 Beurteilung der Streuung der Einzelwerte		10.2.4 Schallemissionsaktivität	69
anhand von Mandel's h- und k-Werten	28	10.2.5 Lokalisierung der Schallereignisse	71
		10.2.6 Auswertung der Ultraschalllaufzeiten	72
		10.3 Einfluss der Lasteinleitung	73
		10.3.1 Art der Lasteinleitung	73
		10.3.2 Breite des Lasteinleitungsstreifens	76

10.3.3 Außermittige Lasteinleitung	77
10.4 Feuchteinfluss	80
<b>11 Zusammenfassung</b>	<b>83</b>
<b>Danksagung</b>	<b>86</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>

## 1 Einleitung

Zur Dimensionierung von Betondecken sind in der „Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ (RStO) [RSTO 2001] standardisierte Oberbauten enthalten. Die in der RStO angegebenen Schichtdicken orientieren sich an den aufgrund der bemessungsrelevanten Beanspruchung zugeordneten Bauklassen. Eine direkte Bemessung in Bezug auf material- und beanspruchungsspezifische Parameter erfolgt durch die standardisierten Oberbauten der RStO nicht. Anforderungen an die Festigkeit des Betons werden allein durch die in den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“ (ZTV Beton-StB 07) [ZTV 2007] geforderten Mindestwerten der Druckfestigkeit gestellt.

Alternativ zur RStO kann die Dimensionierung jedoch auch nach der „Richtlinie für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen“ (RDO-Beton 09) [RDO 2009] erfolgen, welche eine direkte Bemessung der Schichtdicken unter Berücksichtigung material- und beanspruchungsspezifischer Parameter zulässt. Hierbei wird dem aus der Verkehrs- und Temperaturbelastung resultierenden einwirkenden Moment das durch die zugebelastete Randfaser aufnehmbare Moment gegenübergestellt. Als entscheidender Materialparameter dient dabei die Spaltzugfestigkeit des Betons, die entsprechend der „Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen – AL Sp-Beton“ [ALSP 2006] ermittelt wird.

Abgesicherte Erkenntnisse über die Präzision des Prüfverfahrens im Hinblick auf die Wiederhol- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind jedoch nicht bekannt. Durch das Forschungsvorhaben soll daher ein Ringversuch zur Ermittlung der statistischen Kennwerte des Prüfverfahrens durchgeführt werden.

## 2 Zielsetzung und Abgrenzung

### 2.1 Forschungsziel

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Durchführung eines Ringversuchs zur Bestimmung der statistischen Kennwerte des Prüfverfahrens zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006]. Durch den Ringversuch sollen dabei statistische Kennwerte zur Präzision des Prüfverfahrens unter Vergleichs- und Wiederholbedingungen ermittelt werden. Hierbei sollen die in der AL Sp-Beton [ALSP 2006] beschriebenen Regelungen für die Erst-/Eignungsprüfung sowie die Übereinstimmungskontrolle Berücksichtigung finden. Im Rahmen des Ringversuchs werden daher Betonzyylinder und eine Versuchsplatte aus einem Laborbeton hergestellt. Weiterhin soll die Eignung des Prüfverfahrens für die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit im Rahmen der Restsubstanzbewertung von Betonfahrbahnen bewertet werden. Hierzu sollen Bestandsbetone unterschiedlicher Entnahmestellen detaillierte Erkenntnisse zur Streuung der Spaltzugfestigkeiten liefern.

Weitere Informationen zum Bruchverhalten unter statischer Spaltzugbeanspruchung sollen durch begleitende Untersuchungen gewonnen werden. Mittels innovativer Prüftechniken sollen dabei die bei der Spaltzugprüfung eintretenden Versagensmechanismen näher untersucht und der Einfluss unterschiedlicher Lasteinleitungsstreifen (Material, Breite, Form) auf das Bruchverhalten herausgearbeitet werden.

Darüber hinaus wurde im Rahmen einer Projekterweiterung ein weiterer kleiner Ringversuch an im Labor hergestellten Mörtelproben durchgeführt. Damit sollte der Einfluss der Materialstreuung auf die Präzision des Prüfverfahrens unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen minimiert werden.

### 2.2 Abgrenzung

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung der Präzision des Verfahrens zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit gemäß den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006]. Die hier festgelegten Bedingungen an die Durchführung der Spaltzugprüfung resultieren teilweise aus praktischen Anforderungen (Geometrie sowie Anzahl der Probekörper, Probenentnahme, etc.), die eine effiziente und wirklichkeitsnahe Bestimmung der Zugfestigkeit von Fahrbahnbetonen im Rahmen

der Kontrollprüfung ermöglichen. Eine Anwendung anderer, in nationalen Normen geregelter Verfahren zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit ist daher nicht zielführend, da durch diese Verfahren die in der AL Sp-Beton [ALSP 2006] berücksichtigten praktischen Anforderungen keine Berücksichtigung finden.

Dennoch wird im Rahmen der durchgeführten begleitenden Untersuchungen zu diesem Forschungsvorhaben Bezug auf die Regelungen der DIN-EN 12390-6:2010 genommen, sofern diese grundlegende mechanische Probleme betreffen und entscheidenden Einfluss auf die Präzision des Prüfverfahrens haben. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter der AL Sp-Beton [ALSP 2006] und DIN-EN 12390-6:2010 gegenübergestellt.

**Tabelle 1:** Gegenüberstellung der Prüfvorschriften AL Sp-Beton [ALSP 2006] und DIN-EN 12390-6:2010

	AL Sp-Beton [ALSP 2006]	DIN-EN 12390 Teil 6:2010
Belastungsgeschwindigkeit [N/mm <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> ]	3,0 ± 0,6	
Geometrie der Lasteinleitungsschiene	konkav	eben
Lasteinleitungsstreifen	Hartfilz	Hartfaser
Breite der Lasteinleitungsschiene [mm]	13	15 (10*)
Probenlänge L [mm]	100 ± 5	k. A.
Durchmesser D [mm]	50 ± 5	k. A.
L/D-Verhältnis	0,5	≥ 1,0
Größtkorn	≤ 22mm	≤ D/3

\* 10 mm entsprechend den Vorgaben gemäß DIN-EN 12390-6:2001

### 2.3 Vorgehensweise

Die Präzision des Prüfverfahrens zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit nach der AL Sp-Beton soll innerhalb eines Ringversuchs bestimmt werden. Die Auswahl des zutreffenden Ringversuchstyps erfolgte in Anlehnung an das FGSV Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen – Teil 3: Planung, Organisation und Durchführung von Ringversuchen [FGSV 2006]. Die Spaltzugfestigkeit wurde insgesamt an 8 Prüflösen unter Verwendung verschiedener Betone und Herstellungstechnologien bestimmt. Die Spaltzugfestigkeit wurde dabei an unter Laborbedingungen hergestellten Probekörpern einer zu Versuchszwecken hergestellten Betonplatte sowie an Bestandsbetonen ermittelt.

Die unter Laborbedingungen hergestellten Zylinder (Ø = 100 mm) dienten der Ermittlung statistischer

Kennwerte, die im Rahmen der Eignungsprüfung gemäß AL Sp-Beton [ALSP 2006] für die Ermittlung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit notwendig sind. Zur Herstellung der Probekörper kam ein Straßenbeton entsprechend ZTV/TL-Beton 07 zum Einsatz. Zusätzlich zu den Laborversuchen wurde aus dem Laborbeton eine Betonplatte zur Entnahme von Bohrkernen hergestellt, deren Prüfung im Rahmen der Übereinstimmungskontrolle entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006] erfolgte.

Des Weiteren wurde ein Mörtel mit einem Größtkorn von 4 mm entwickelt, um den materialbedingten Einfluss des Größtkorns auf die Präzision des Prüfverfahrens zu reduzieren. Die Herstellung der Laborprobekörper erfolgte in Analogie zu den Versuchen des Laborbetons.

Für die Prüfung von Bestandsbetonen wurden vier Autobahnabschnitte ausgewählt und entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006] beprobt. Die Prüfung der Bestandsbetone diente der Überprüfung des Prüfverfahrens im Hinblick auf die Bewertung der Restsubstanz von Betonfahrbahnen.

### 3 Grundlagen

Der Spaltzugversuch stellt eine indirekte Methode zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Beton dar. Neben dem Spaltzugversuch existieren noch weitere Verfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Beton. Von zentraler Bedeutung sind hierbei der Biegezugversuch sowie der zentrische Zugversuch, wobei nur durch das letztere Verfahren eine reine Zugbelastung im Probekörper hervorgerufen wird. Somit sind der Spaltzug- und der Biegezugversuch als indirekte Verfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Beton zu betrachten.

Die einfache Durchführung des Spaltzugversuchs und der geringe zur Probenvorbereitung benötigte zeitliche Aufwand ermöglichen eine effiziente Bestimmung der Zugfestigkeit von Beton unter praktischen Bedingungen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht in der Möglichkeit der Prüfung zylinderförmiger Probekörper. Dies ermöglicht die Ermittlung der Zugfestigkeit an Proben (Bohrkernabschnitten) die ohne großen technischen Aufwand direkt aus dem Bauwerk entnommen werden können. Somit ist der Spaltzugversuch ein geeignetes Verfahren zur Kontrollprüfung der am Bauwerk geforderten Materialeigenschaften.

Die Entwicklung des Spaltzugversuches erfolgte zu Beginn der 1940er Jahre parallel durch den Brasilianer Fernando L.L.B. Carneiro sowie den Japaner Tsueno Akazawa. Aufgrund der zeitlich geringfügig früheren Veröffentlichung durch den Brasilianer Carneiro wird der Versuch in der Literatur auch häufig als „Brazilian Test“ bezeichnet. In zahlreichen nationalen Standards (DIN-EN 12390-6:2010, ASTM C496/ C496M:2011) hat der Spaltzugversuch Eingang in die nationalen Normen gefunden. Nähere Informationen zur geschichtlichen Entwicklung des Prüfverfahrens sind in [FAIR 2002] sowie [MALA 2010] gegeben.

Wie bereits zuvor erwähnt, handelt es sich beim Spaltzugversuch um ein indirektes Verfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Beton. Beim Spaltzugversuch wird der Probekörper (Zylinder, würfelförmige oder prismatische Probekörper) durch eine diametrale Belastung beansprucht. Infolge dieser Belastung kommt es zur Ausbildung eines zweiachsigen Spannungszustandes innerhalb des Probekörpers. Die dabei resultierenden Querspannungen führen zu einem Zugversagen des Probekörpers senkrecht zur Belastungsebene [MALA 2010]. Das sich dabei einstellende Bruchbild des Probekörpers wird stark durch die Breite und das Material des verwendeten Lasteinleitungstreifens beeinflusst. Untersuchungen zum Einfluss des Lasteinleitungstreifens wurden unter

anderem von [WRIGHT 1955] und [MITCHELL 1961] durchgeführt und werden in Abschnitt 0 näher diskutiert.

## 4 Prüfstellen

### 4.1 Auswahl der Prüfstellen

Die Auswahl der am Ringversuch teilnehmenden Prüfstellen erfolgte durch die BAM in Absprache mit der BAST. Bei der Auswahl der Prüfstellen wurde darauf Wert gelegt, dass mindestens drei Prüfstellen eine baugleiche Spaltzugprüfvorrichtung verwenden, um eine Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse zu gewährleisten. Insgesamt nahmen 13 Prüfstellen aus Forschung und Industrie an dem Ringversuch teil. Die teilnehmenden Prüfstellen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

**Tabelle 2:** Teilnehmer des Ringversuchs

<b>Universitäten (1)</b>
TU Dresden, Professur für Straßenbau; Dresden
<b>Hochschulen und Fachhochschulen (3)</b>
FH Köln, Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser; Köln
Hochschule Anhalt, Fachgebiet Straßenbau und Erdbau; Dessau
HTW Dresden, Lehrgebiet Baustoffe; Dresden
<b>RAP Stra Prüfstellen (5)</b>
Aalener Baustoffprüfinstitut GmbH; Aalen-Fachsenfeld
ABE Bauprüf- und -beratungsgesellschaft mbH; Stahnsdorf
BGI Brambach GmbH; Halle (Saale)
Landesbetrieb Bau Sachsen Anhalt; Halberstadt
TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH; Köln
<b>Prüfinstitute der Industrie (2)</b>
Bilfinger Berger SE, Zentrales Labor für Baustofftechnik; Wiesbaden
VDZ – Verein Deutscher Zementwerke, Abteilung Betontechnik; Düsseldorf
<b>Bundesanstalten (2)</b>
BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung; Berlin
BAST – Bundesanstalt für Straßenwesen; Bergisch Gladbach

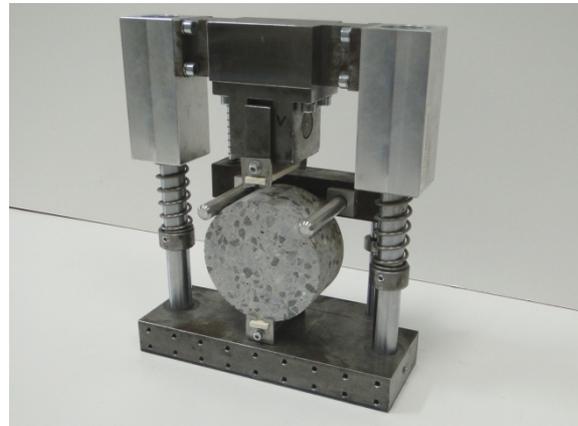
### 4.2 Ergebnisse des Laboraudits

#### 4.2.1 Verwendete Prüfvorrichtungen

Durch die am Ringversuch teilnehmenden Prüfstellen wurden unterschiedliche Prüfvorrichtungen zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit verwendet. Es kamen die nachfolgenden Prüfvorrichtungen zum Einsatz:

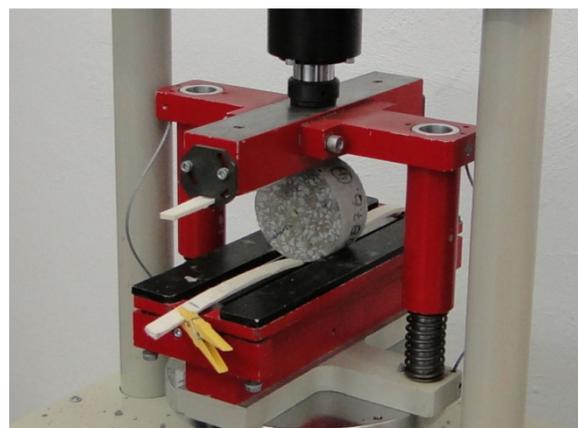
**Typ 1:** Die Prüfvorrichtung des Typs 1 stellt die im Ringversuch am häufigsten verwendete Prüfvorrichtung dar. Abbildung 1 zeigt eine modifizierte Form der Prüfvorrichtung mit in Lastrichtung be-

weglicher Probenzentrierung und Halterungen zur Befestigung der Hartfilzstreifen.



**Abbildung 1:** Prüfvorrichtung Typ 1 mit modifizierter Probenzentrierung

**Typ 2:** Die in Abbildung 2 dargestellte Prüfvorrichtung wurde durch 2 Prüfstellen im Ringversuch verwendet. Sie ist eine Modifikation einer Prüfvorrichtung zur Durchführung der Spaltzugprüfung nach DIN-EN 12390-6:2010 und ermöglicht die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit gemäß AL Sp-Beton [ALSP 2006] mit konkaven Lasteinleitungsschienen. Eine Zentrierung der Spaltzugprobe erfolgt durch Federplatten im unteren Teil der Probe. Eine Verdrehbarkeit der oberen Lasteinleitung ist durch im oberen Bereich der Gleithülsen angeordnete Gelenke möglich. Die Verdrehbarkeit der oberen Lasteinleitung ist, im Vergleich zur Prüfvorrichtung des Typ 1, als geringer einzustufen.



**Abbildung 2:** Prüfvorrichtung Typ 2

**Typ 3:** Die Prüfvorrichtung des Typs 3 ist eine weitere Modifikation einer Prüfvorrichtung zur Durchführung der Spaltzugprüfung nach DIN-EN 12390-6:2010 und entspricht in ihrer Grundbauweise der Prüfvorrichtung des Typ 2. Die in Abbildung 3 dargestellte modifizierte Version der Prüfvorrichtung ist gekennzeichnet durch eine verbesserte Pro-

benzentrierung in x- und z-Richtung sowie vier zusätzliche Stahlstäbe zur verbesserten seitlichen Führung der oberen Lasteinleitung. Eine freie Verdrehbarkeit der oberen Lasteinleitung über entsprechende Lager ist nicht gegeben. Dennoch kann es zu einem leichten Verdrehen der oberen Lasteinleitung infolge des Spiels zwischen Haltefeder und dem Zapfen der oberen Halteplatte kommen. Die Prüfvorrichtung verfügt, ebenso wie die Prüfvorrichtung des Typs 2, über konkave Lasteinleitungsschienen entsprechend AL Sp-Beton [ALSP 2006].

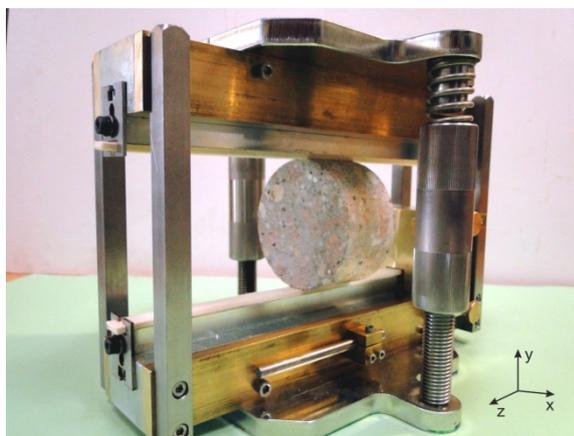


Abbildung 3: Prüfvorrichtung Typ 3

**Typ 4:** Die Prüfvorrichtung des Typs 4 wurde, ebenso wie die Prüfvorrichtungen 5 und 6, durch jeweils eine Prüfstelle verwendet. Sie stellt eine Modifikation einer nach TGL 20801/21 zur Spaltzugprüfung verwendeten Prüfvorrichtung dar. Die Modifikation der Lasteinleitungsschienen der Prüfvorrichtung erlaubt die Durchführung der Spaltzugprüfung entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006].



Abbildung 4: Prüfvorrichtung Typ 4

**Typ 5:** Bei der Prüfvorrichtung des Typs 5 handelt es sich um eine durch die Firma infraTest Prüftechnik GmbH vertriebene Prüfvorrichtung. Die Verdrehbarkeit der oberen Lasteinleitung ist durch die im oberen Bereich angeordneten Gummipuffer gewährleistet. Jedoch ist der einer Verdrehung entgegengebrachte Widerstand abhängig von der Steifigkeit der verwendeten Gummipuffer (Abbildung 5). Die seitliche Zentrierung der Spaltzugprobe erfolgt über im unteren Bereich angebrachte Metallbleche. Eine konkave Ausformung der Lasteinleitungsschienen entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006] ist gegeben.



Abbildung 5: Prüfvorrichtung Typ 5

**Typ 6:** Die Prüfvorrichtung des Typs 6 weist in ihrer Bauweise große Abweichungen zu den zuvor beschriebenen Prüfvorrichtungen auf. Eine Verdrehbarkeit der in Abbildung 6 ersichtlichen oberen Lasteinleitungsschiene ist hier bauartbedingt nicht gegeben. Des Weiteren verfügt diese Prüfvorrichtung über keine Möglichkeit der mechanischen Probenzentrierung. Die seitliche Ausrichtung erfolgt hier, ebenso wie die Ausrichtung entlang der Probenlängsachse, durch den Prüfer nach Augenmaß. Die Lasteinleitungsschienen sind entsprechend AL Sp-Beton [ALSP 2006] konkav ausgeformt.



Abbildung 6: Prüfvorrichtung Typ 6

Ein Überblick der spezifischen Merkmale der verwendeten Prüfvorrichtungen ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Merkmale der im Ringversuch verwendeten Prüfvorrichtungen

Prüfvorrichtung	Geometrie der Lasteinleitungsschiene	Probenzentrierung		Beweglichkeit der oberen Schiene	Leichtgängigkeit / Federkonstante
		Längsrichtung	Querrichtung		
Typ 1	AL Sp-Beton	nein	durch zwei Stahlstifte im oberen Bereich	gelenkige Lagerung der oberen Lasteinleitungsschiene	Leichtgängigkeit gegeben, aber unterschiedliche Federkonstanten
Typ 2	AL Sp-Beton	nein	Federplatten im unteren Bereich	oberer Teil der Prüfvorrichtung gelenkig gelagert	unterschiedliche Federkonstanten
Typ 3	AL Sp-Beton	vorhanden	durch zwei Stahlstifte im mittleren Bereich	bewegliche Lagerung des oberen Teils der Prüfvorrichtung	Feder mit hoher Federkonstante
Typ 4	AL Sp-Beton	nein	im mittleren Bereich,	gewährleistet durch bewegliche Lagerung der Lasteinleitungsschiene	leichtgängig
Typ 5	AL Sp-Beton	nein	über Bleche im unteren Bereich	bewegliche Lagerung des oberen Teils der Lasteinleitungsschiene durch Gummipuffer	Leichtgängigkeit gewährleistet in Abhängigkeit der Federkonstante der verwendeten Federn
Typ 6	AL Sp-Beton	nein	nein	nein	leichtgängig, da keine Feder vorhanden

#### 4.2.2 Prüfstellenspezifische Merkmale

Die in Abschnitt 4.1 aufgeführten Prüfstellen wurden im Rahmen des Ringversuches einem Labordaudit unterzogen. Bei der Begutachtung der Prüfstellen wurden die für die Durchführung der Spaltzugprüfung notwendige Geräteausrüstung, Vorkonditionierung der Probekörper sowie deren Prüfung gemäß AL Sp-Beton [ALSP 2006] überprüft. Die gerätetechnische Ausstattung der Prüfstellen wurde hinsichtlich ihrer Funktionstüchtigkeit, Anforderungen an die Genauigkeitsklasse der verwendeten Messtechnik sowie Einhaltung entsprechender Fristen der Kalibrierung kontrolliert. Für eine einheitliche Probenvorbereitung und -lagerung entsprechend den Vorgaben der Standardarbeitsanweisung (Abschnitt 5.6.2) waren durch die einzelnen Prüfstellen geeignete Möglichkeiten nachzuweisen. Dies umfasste sowohl das Vorhandensein temperierter Behälter für eine Un-

terwasserlagerung der Probekörper als auch die Möglichkeit der Lagerung unter definierten klimatischen Bedingungen in einer Klimakammer oder einem Klimaraum.

Soweit entsprechende Probekörper in der jeweiligen Prüfstelle verfügbar waren, wurde die Durchführung der Spaltzugprüfung exemplarisch nachvollzogen und eventuelle Abweichungen zu den Vorgaben der Standardarbeitsanweisung dokumentiert. Die während der Labordaudits erfassten prüfstellenspezifischen Merkmale sind in Tabelle 4 für die Probenlagerung und in Tabelle 5 für die verwendete Prüftechnik aufgelistet.

**Tabelle 4:** Übersicht prüfstellenspezifischer Merkmale der Probenvorbereitung

Prüfstelle	Probenvorbereitung		
	Wasserbecken / Regelung	Klimakammer / Regelung	Waage ( $\pm 0,01$ g) / Kalibrierung
1	vorhanden / Regelung automatisch	Klimaraum / Regelung mittels Hygrometers	vorhanden / Kalibrierung bis Juli 2012
2	vorhanden / Regelung automatisch	Klimakammer / Regelung automatisch	Genauigkeit 0,1 g / Kalibrierung November 2010
3	Wasserbehälter in Klimakammer	Klimakammer / Regelung automatisch	Genauigkeit 0,1 g / Kalibrierung März 2011
4	vorhanden / Regelung automatisch	nicht vorhanden; Aufzeichnung der Klimadaten mittels Datenlogger	vorhanden / Eigenkalibrierung
5	vorhanden / Regelung automatisch	Thermoschrank / automatische Temperaturregelung	vorhanden / Kalibrierung Februar 2011
6	Wasserbehälter in Klimakammer	Klimaraum / Thermohygrograph	vorhanden / Kalibrierung Mai 2011
7	vorhanden / Regelung automatisch	klimatisiertes Labor / Datenlogger	Genauigkeit 0,1 g / Kalibrierung November 2010
8	vorhanden / Regelung manuell	Klimakammer / Regelung automatisch	vorhanden / Kalibrierung März 2011
9	vorhanden / Regelung automatisch	Klimaraum / Thermohygrograph	vorhanden / Januar 2011
10	vorhanden / Regelung manuell	Klimakammer / Regelung automatisch	1 g / Kalibrierung April 2011
11	vorhanden / Regelung automatisch	nicht vorhanden; Aufzeichnung der Klimadaten mit Hygro-Thermometer	vorhanden / Kalibrierung September 2010
12	vorhanden / Regelung automatisch	Klimaraum / Thermohygrograph	vorhanden / jährliche Kalibrierung
13	vorhanden /	Klimaraum / Datenlogger	vorhanden / Eigenkalibrierung

Tabelle 5: Im Rahmen des Ringversuchs verwendete Prüftechnik der einzelnen Prüfstellen

Prüfstelle	Prüfvorrichtung	Spaltzugfestigkeit			Druckfestigkeit		
		Prüfmaschine / Regelung	Kraftmessung / Messbereich	Genauigkeit / Kalibrierung	Prüfmaschine / Regelung	Kraftmessung / Messbereich	Genauigkeit / Kalibrierung
1	Typ 6	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 10 - 180 kN	Klasse 1 / Juni 2010	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 150 - 3000 kN	Klasse 1 / Mai 2010
2	Typ 1	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 0,5 - 100 kN	Klasse 1 / August 2011	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 300 - 3000 kN	Klasse 1 / Juni 2011
3	Typ 1	elektromechanisch / automatische Regelung	KMD / 0,5 - 100 kN	Klasse 1 / April 2009	servohydraulisch / automatische Regelung	k. A.	k. A.
4	Typ 2	elektr. Spindeltrieb / elektronisch	KMD / 5 - 50 kN	Klasse 1 / Dezember 2010	servohydraulisch / Handsteuerung	KMD / 300 - 3000 kN	Klasse 1 / Dezember 2010
5	Typ 4	servohydraulisch / per Hand über Potentiometer	KMD / 5 - 50 kN	Klasse 1 / März 2011	servohydraulisch / Handsteuerung	KMD / 40 - 500 kN	Klasse 2 / März 2011
6	Typ 5	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 5 - 50 kN	Klasse 1 / Februar 2011	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 300 - 3000 kN	Klasse 1 / Februar 2011
7	Typ 3	elektromechanisch / automatische Regelung	KMD / 0,5 - 75 kN	Klasse 1 / Mai 2012	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD /	Klasse 1 / November 2010
8	Typ 1	elektr. Spindeltrieb / automatische Regelung	KMD / 10 - 100 kN	Klasse 1 / Mai 2010	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 300 - 3000 kN	Klasse 1 / Mai 2010
9	Typ 1	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 3 - 300 kN	Klasse 1 / Juli 2011	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 60 - 6000 kN	Klasse 1 / Juli 2011
10	Typ 1	servohydraulisch / elektronisch	KMD / 20 - 200 kN	Klasse 1 / September 2010	servohydraulisch / automatische Regelung	k. A.	k. A.
11	Typ 2	servohydraulisch / elektronisch	KMD / 30 - 300 kN	Klasse 1 / Mai 2011	servohydraulisch / elektronisch	k.A.	k. A.
12	Typ 1	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 30 - 300 kN	Klasse 1 / Februar 2011	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 300 - 3000 kN	Klasse 1 / Februar 2011
13	Typ 1	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 1- 100 kN	Klasse 1 /	servohydraulisch / automatische Regelung	KMD / 10 - 1000 kN	Klasse 1 /

KMD: Kraftmessdose

## 5 Probekörper und Versuchsvorgaben

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erläutert erfolgte die Ermittlung der statistischen Kenngrößen an Probekörpern unterschiedlicher Betonzusammensetzung. Die Zuordnung der verwendeten Betonarten zu den einzelnen Prüflosen ist in Tabelle 6 gegeben.

**Tabelle 6:** Übersicht der Probekörper der einzelnen Prüflose

Prüflos	Betonart	Probenart
1	Laborbeton	Zylinderform
2	Laborbeton	Zylinderform
3	Laborbeton / Platte	Bohrkern
4	Bestandsbeton	Bohrkern
5	Bestandsbeton	Bohrkern
6	Bestandsbeton	Bohrkern
7	Bestandsbeton	Bohrkern
8	Labormörtel	Zylinderform

Nachfolgend werden die verwendeten Betonmischungen und die Herstellung der Probekörper näher erläutert.

### 5.1 Laborbeton

Die im weiteren Kontext verwendete Bezeichnung Laborbeton bezieht sich auf die für die Herstellung der Prüflose 1 bis 3 verwendete Betonmischung. Hierbei kam ein Straßenbeton entsprechend der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Betonzusammensetzung zum Einsatz. Der Beton wurde in einem Fertigbetonwerk gemischt. Für jede Produktionscharge wurden circa 80 Liter aus einem Fahrnischer entnommen und für die Bestimmung der Frischbetonkennwerte sowie die Herstellung der Zylinderproben verwendet.

#### 5.1.1 Betonzusammensetzung

Für die Herstellung der Probekörper des Prüfloses 1, 2 und 3 kam ein Beton mit einem Größtkorn von 16 mm gemäß ZTV/TL-Beton 07; Bkl.: SV, I-III zur Anwendung, welcher nach DIN-EN 206 als C 30/37; XF4; XM2; F2 zu klassifizieren ist. Die Zusammensetzung der verwendeten Betonmischung ist Tabelle 7 zu entnehmen.

**Tabelle 7:** Betonzusammensetzung des Betons der Prüflose 1 bis 3

Zement	Art		CEM I 42,5 N
	Gehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	360
w / z Wert			0,43
Gesteinskörnung	0/2 (Sand)	[Vol.-%]	30
	2/8 (Splitt)		30
	8/16 (Splitt)		40
Betonzusatzmittel	BV/FM	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,8
	LP	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,72

#### 5.1.2 Frisch- und Festbetonkennwerte

An den entnommenen Betonproben wurden zu Beginn der Herstellung der ersten 13 Proben die Frischbetonkennwerte bestimmt (Abbildung 7). Im Rahmen der Frischbetonprüfung wurden das Ausbreitmaß (DIN-EN 12350-5:2009), die Frischbetonrohichte (DIN-EN 12350-6:2009) sowie der Luftporengehalt (DIN-EN 12350-7:2009) ermittelt. Eine weitere Prüfung des Frischbetons erfolgte nach der Herstellung der ersten 13 Zylinderproben. Die Zeitdifferenz zwischen erster und zweiter Frischbetonprüfung betrug im Mittel circa 30 min. Die ermittelten Frischbetonkennwerte der einzelnen Produktionschargen und deren Zuordnung zu den Probekörperserien sind in Tabelle 8 dargestellt.



**Abbildung 7:** Frischbetonprüfung (Ausbreitmaß) während der Herstellung der Zylinder des Prüfloses 1

Zusätzlich wurden je Produktionscharge 3 Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeit hergestellt. Die Herstellung und Lagerung der Betonwürfel erfolgte entsprechend DIN-EN 12390-2:2009. Die Probekörper wurden 1 Tag nach der Herstellung entschlackt und bis zum 7. Tag unter Wasser gelagert. Die anschließende Lagerung bis zum Prüftermin erfolgte bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte. Im Alter von 28 Tagen wurde die Druckfestigkeit nach DIN-EN 12390-3:2009 bestimmt. Die Mittelwerte der Druckfestigkeitsprüfung sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Frisch- und Festbetonkennwerte des Laborbetons der Prüflose 1 und 2

Char- gen Nr.	Herstell- datum	Proben Nr.	Ausbreitmaß		Frischbeton- dichte [kg/m³]	LP-Gehalt [Vol.-%]	Rohdichte [kg/m³]	f <sub>c,dry</sub> [N/mm²]
			Zeit	[mm]				
455304	19.04.2011	C9 – C21	t <sub>0</sub> + 10 min	42,5	2366,8	5,4	-	-
		C1 – C8; C22-C26	t <sub>0</sub> + 50 min	40,0	2393,1	4,5	-	-
		W1 – W3	-	-	2337,9	-	2353,4	53,3
455314	19.04.2011	A1 – A13	t <sub>0</sub> + 10 min	39,0	2353,5	5,8	-	-
		A14 – A26	t <sub>0</sub> + 40 min	37,5	2389,8	4,5	-	-
		W4 – W6	-	-	2345,3	-	2364,2	53,5
455320	19.04.2011	B14 – B26	t <sub>0</sub> + 10 min	41,5	2396,3	4,5	-	-
		B1 – B13	t <sub>0</sub> + 40 min	36,5	2380,6	4,3	-	-
		W7 – W9	-	-	2372,0	-	2377,0	62,6
455325	19.04.2011	D1 – D13	t <sub>0</sub> + 10 min	39,5	2335,4	5,9	-	-
		D14 – D26	t <sub>0</sub> + 36 min	37,0	2350,4	5,5	-	-
		W10 – W12	-	-	2338,2	-	2352,6	59,3
<b>MW</b>				<b>39,2</b>	<b>2370,7<sup>#</sup></b>	<b>5,1</b>	<b>2361,8</b>	<b>57,2</b>
455420	27.04.2011	E9 – E21	t <sub>0</sub> + 10 min	41,5	2349,9	5,6	-	-
		E1 – E8; E22 – E26	t <sub>0</sub> + 34 min	39,0	2368,8	4,8	-	-
		W1 – W3	-	-	2356,2 <sup>#</sup>	-	2344,3	56,8
455424	27.04.2011	F1 – F13	t <sub>0</sub> + 10 min	42,5	2348,5	5,4	-	-
		F14 – F26	t <sub>0</sub> + 35 min	40,0	2346,6	5,0	-	-
		W4 – W6	-	-	2335,8 <sup>#</sup>	-	2328,7	54,7
455429	27.04.2011	G1 – G13	t <sub>0</sub> + 10 min	42,5	2305,3	5,9	-	-
		G14 – G26	t <sub>0</sub> + 35 min	40,5	2326,4	5,9	-	-
		W7 – W9	-	-	2353,8 <sup>#</sup>	-	2366,4	59,6
455435	27.04.2011	H1 – H13	t <sub>0</sub> + 10 min	41,5	2334,9	5,5	-	-
		H14 – H26	t <sub>0</sub> + 39 min	38,5	2374,1	4,2	-	-
		W10 – W12	-	-	2371,1 <sup>#</sup>	-	2379,7	60,9
<b>MW</b>				<b>40,8</b>	<b>2344,3<sup>#</sup></b>	<b>5,3</b>	<b>2354,7</b>	<b>58,0</b>

t<sub>0</sub> - Zeitpunkt der Wasserzugabe

# Mittelwert der Frischbetonprüfung ohne Berücksichtigung der Werte der hergestellten Betonwürfel

### 5.1.3 Probekörperherstellung

Die Herstellung der Proben des Prüfloses 1 und 2 erfolgte im Transportbetonwerk unter definierten Randbedingungen entsprechend DIN-EN 12390-2 (Abbildung 8). Die mit einem Aufsatzrahmen versehenen Zylinderformen wurden befüllt und für 15 s auf einem transportablen Rütteltisch verdichtet. Überschüssiges Material wurde nach dem Verdichten entfernt und die Oberfläche der Proben geglättet.

Je Charge wurden 26 Proben in zwei Serien a 13 Proben hergestellt. Die Herstellung der ersten Serie erfolgte direkt nach der Entnahme der Probe aus dem Fahrmischer und der Bestimmung der zugehörigen Frischbetonkennwerte. Vor der Herstellung der Proben der zweiten Serie wurden die Frischbetonkennwerte erneut bestimmt. Für jedes Prüflos wurden Betonproben aus 4 Produktionschargen des jeweiligen Produktionstages entnommen. Die Zuordnung der einzelnen Probekörper zu den jeweiligen Produktionschargen und Herstelltagen ist Tabelle 8 zu entnehmen.



Abbildung 8: Herstellung der Zylinderproben des Prüfloses 1

### 5.2 Versuchsplatte

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erwähnt, erfolgte die Herstellung einer Betonplatte zur Entnahme von Betonkernen (Prüflos 3). Ziel dieser Untersuchung war es, einen Vergleich der Präzision zwischen der Erst-/ Eignungsprüfung (Prüflos 1 und 2) und der Übereinstimmungskontrolle (Prüflos 3) zu ermögli-

chen. Aus diesem Grund kam die bereits bei den Prüflosen 1 und 2 verwendete Betonmischung zum Einsatz. Nähere Angaben zur Betonzusammensetzung sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

### 5.2.1 Plattenherstellung

Die Herstellung der Versuchsplatte des Prüfloses 3 erfolgte im Rahmen des Betonierens der Fahrbahnplatten eines Autobahnrastplatzes (BAB A12, Rastplatz „Kersdorfer See“). Hierzu wurde in einem separaten Bereich des Rastplatzes eine Betonplatte mit den Abmessungen 3,8 m x 4,0 m x 0,25 m unter Verwendung einer Randabschalung hergestellt (Abbildung 9).



Abbildung 9: Einbringen des Betons

Nach dem Einbringen des Betons und des Verteilens mittels eines Böschungslöffels wurde der Beton durch vier an dem Böschungslöffel montierte Rüttelflaschen verdichtet (Abbildung 10). Im Anschluss daran wurde die Oberfläche der Platte mit einer Rüttelbohle geglättet und ein Nachbehandlungsmittel zum Schutz gegen vorzeitiges Austrocknen auf die Plattenoberfläche aufgebracht.



Abbildung 10: Verdichten der Versuchsplatte

### 5.2.2 Bohrkernentnahme

Im Alter von 19 Tagen wurde mit der Entnahme von Bohrkernen aus der Versuchsplatte begonnen (Abbildung 11). Die Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm wurden in Anlehnung an das Bohrschema der Prüflose 4 bis 7 (siehe Abbildung 13) entnommen – jedoch betrug der Abstand der aus der Versuchsplatte entnommenen Bohrkern 125 mm. Zur Vermeidung des Einflusses des Randbereichs auf die Gefügestruktur des Betons infolge unzureichender Verdichtung, wurde ein Mindestrandabstand von circa 30 cm der Bohrkern zum Rand der Versuchsplatte gewählt.



Abbildung 11: Bohrkernentnahme aus der Versuchsplatte

Die entnommenen Bohrkern wurden vor Ort dokumentiert und entsprechend ihrer Lage in der Platte nummeriert. Im Anschluss an die Bohrkernentnahme erfolgte die Herstellung der erforderlichen Probekörper entsprechend des in Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Schemas.

### 5.3 Bestandsbeton

Die Bezeichnung Bestandsbeton bezieht sich auf die im Rahmen der Prüflose 4 bis 7 geprüften Probekörper zur Ermittlung der Präzision des Prüfverfahrens zur die Bewertung der Restsubstanz von Fahrbahndecken aus Beton. Zu diesem Zweck wurden vier repräsentative Entnahmestellen in Waschbetonweise ausgewählt, die nachfolgend näher beschrieben werden.

#### 5.3.1 Entnahmestellen

Die Festlegung der vier Autobahnabschnitte zur Entnahme von Bohrkernen aus dem Standstreifen

erfolgte in Absprache mit der BAST. Die ausgewählten Fahrbahnabschnitte sollten die derzeit übliche Bauweise in Waschbeton erfassen. Weitere Kriterien bei der Auswahl waren die Herstellung durch unterschiedliche Baufirmen und die Berücksichtigung verschiedener Herstellungsalter. Darüber hinaus sollten zu den beprobten Autobahnabschnitten entsprechende Informationen zur Betonzusammensetzung sowie den Ergebnissen der Erst-, Eigen- und Kontrollprüfungen vorliegen. Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Punkte wurden die in Tabelle 9 aufgelisteten Entnahmestellen festgelegt.

Tabelle 9: Übersicht der Entnahmestellen

Prüflos	Entnahmestelle	Kilometer	Platten Nr.	Fahrtrichtung	Fertigstellung	Herstellfirma	Größtkorn	Vlies	Anzahl Bohrkern	
									gesamt	verworfen
3	Versuchsplatte Rastplatz „Kersdorfer See“				4/2011	Max Bögl	16 mm	-		
4	BAB A11	44,0 + 45	294	Berlin	2010	GP Papenburg	22 mm	nein	222	8
5	BAB A2	8,5 + 35	384	Magdeburg	10/2010	Bickhardt Bau	22 mm	ja	200	11
6	BAB A14	64,0 + 110	213	Halle	09/2007	Heilit+Woerner	32 mm	ja	228	47
7	BAB A38	217,0 + 475	377	Göttingen	04/2006	Berger Bau	32 mm	nein	227	14

#### 5.3.2 Betonzusammensetzung

Angaben zur Betonzusammensetzung der in den einzelnen Entnahmestellen verwendeten Betonmischungen sowie der im Rahmen der Erstprüfung ermittelten Frischbetonkennwerte und Druckfestigkeiten sind in Tabelle 10 gegeben.

Bei den Prüflosen 4 und 5 handelt es sich sowohl beim Unterbeton, als auch beim Waschbeton, um vergleichbare Betonzusammensetzungen. Das Größtkorn des Unterbetons beider Mischungen beträgt 22 mm, bei geringfügig abweichendem Zementgehalt ( $350 \text{ kg/m}^3$  Prüflos 4;  $340 \text{ kg/m}^3$  Prüflos 5) und einheitlichem w/z-Wert von 0,44. Als grobe Gesteinskörnung kamen in beiden Fällen Edelsplittite in den Fraktionen 2/8, 8/16 und 16/22 zum Einsatz sowie Sande der Fraktion 0/2. Die Waschbetone beider Entnahmestellen sind gekennzeichnet durch einen identischen Zementgehalt von  $420 \text{ kg/m}^3$  bei geringfügig unterschiedlichem w/z-Werten (0,41 Prüflos 4; 0,40 Prüflos 5). Für die Gesteinskörnung des Waschbetons wurden die Edelsplittite des Unterbetons in den Fraktionen 2/8 (Prüflos 4) bzw. 2/5 und 5/8 (Prüflos 5) verwendet. Die Sandfraktion des jeweiligen Waschbetons setzt sich aus der bereits zur Herstellung des Un-

terbetons verwendeten Sandes der Fraktion 0/2 zusammen.

Die Betonzusammensetzung des Unterbetons der Prüflose 6 und 7 unterscheidet sich von den Prüflosen 4 und 5 sowohl in der Art des Zuschlages, als auch in der Wahl des Größtkorns. Zum Einsatz kamen hier Kiese in den Fraktionen 2/8, 8/16 und 16/32 in Verbindung mit einem Sand 0/2. Beide Betonmischungen sind durch einen Zementgehalt von  $350 \text{ kg/m}^3$  bei unterschiedlichen w/z-Werten (0,44 Prüflos 6; 0,40 Prüflos 7) gekennzeichnet. Die Herstellung der jeweiligen Waschbetone erfolgte unter Verwendung von Edelsplittiten der Fraktionen 5/8 (Prüflos 6) bzw. 2/5 und 5/8 (Prüflos 7) sowie eines Sandes der Fraktion 0/2. Anzumerken ist hierbei, dass es sich beim Waschbeton des Prüfloses 6 um eine Ausfallkörnung handelt. Die Zementgehalte beider Waschbetone betragen  $430 \text{ kg/m}^3$  (Prüflos 6) bzw.  $420 \text{ kg/m}^3$  (Prüflos 7) bei einem w/z-Wert von 0,40 (Prüflos 6) bzw. 0,45 (Prüflos 7). Für die Herstellung aller Betone (Wasch- und Unterbeton) wurde ein Luftporenbildner verwendet. Zusätzlich kam zur Steuerung der Verarbeitbarkeit der Waschbetone ein Betonverflüssiger zum Einsatz. Nähere Informationen zu den verwendeten Betonzusatzmittel sind der Tabelle 10 zu entnehmen.

Informationen zur Herstellung der Fahrbahndecken (Art des Gleitschalungsfertigers, verwendete Nachbehandlungsmittel / Oberflächenverzögerer,

klimatische Randbedingungen während des Betonierens, etc.) der einzelnen Entnahmestellen liegen nicht vor.

**Tabelle 10:** Betonzusammensetzung sowie Frisch- und Festbetonkennwerte der Prüflose 4 bis 7

			Prüflos 4		Prüflos 5		Prüflos 6		Prüflos 7	
			BAB A11 (Chorin)		BAB A2 (Lehnin)		BAB A14 (Klinga)		BAB A38 (SÜL)	
			UB	WB	UB	WB	UB	WB	UB	WB
Zement	Art		CEM I 42,5 N (st)		CEM I 42,5 N (st)		CEM I 32,5 R (st)		CEM I 32,5 R (st)	
	Gehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	350	420	340	420	350	430	350	420
w/z Wert			0,44	0,41	0,44	0,40	0,44	0,40	0,40	0,45
Gesteinskörnung	0/2	[Vol.-%]	31,7 (SA)	31,7 (SA)	29,7 (SA)	29,8 (SA)	28 (SA)	30 (SA)	31 (SA)	34 (SA)
	2/5		-	-	-	40,1	-	-	-	31 (SP)
	5/8		-	-	-	30,1	-	70 (SP)	-	35 (SP)
	2/8		15,8 (SP)	68,3 (SP)	10,0 (SP)	-	16 (KI)	-	12 (KI)	-
	8/16		25,7 (SP)	-	25,1 (SP)	-	21 (KI)	-	22 (KI)	-
	16/22		26,8 (SP)	-	35,2 (SP)	-	-	-	-	-
	16/32		-	-	-	-	35 (KI)	-	35 (KI)	-
Beton-zusatzmittel	BV	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	1,68	-	1,68	-	1,29	-	1,68
	LP	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,63	0,71	0,102	0,126	0,35	0,6	0,53	0,63
LP-Gehalt		[Vol.-%]	5,0	6,5	5,9	6,5	5,0	6,2	-	-
Verdichtungsmaß (10 min)		[-]	-	-	1,16	1,22	1,29	1,23	-	-
28 Druckfestigkeit		[N/mm <sup>2</sup> ]	48,7	50,3	46,8	47,2	46,0	48,0	-	-
Rohdichte (Ringversuch)		[kg/m <sup>3</sup> ]	2375	2297	2364	2154	2355	2189	2348	2158

UB Unterbeton WB Waschbeton SA Sand SP Splitt KI Kies SÜL Südumfahrung Leipzig

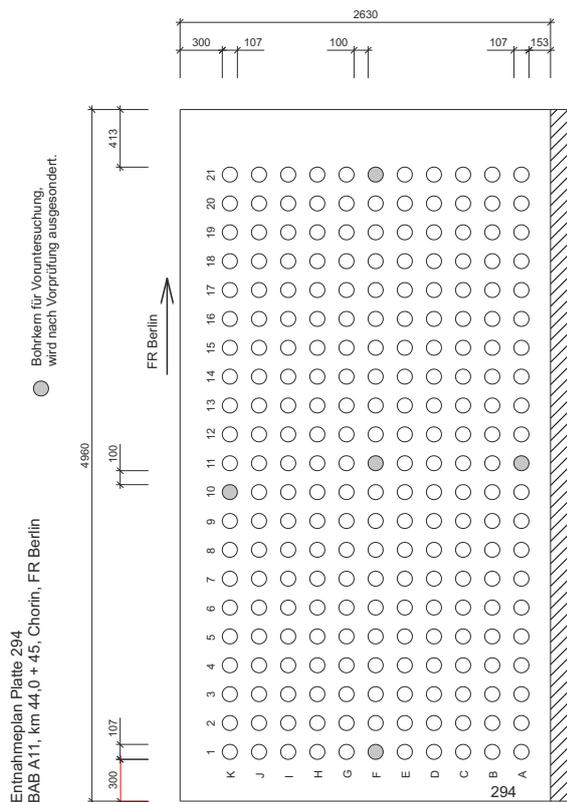
### 5.3.3 Bohrkernentnahme

Im Vorfeld der Bohrkernentnahme erfolgte in der 25. KW 2011 eine Streckenbegehung mit Mitarbeitern der BAST zwecks Festlegung der zu beprobenden Fahrbahnplatten. Hierbei wurden im Bereich der Entnahmestellen verschiedene Fahrbahnplatten des Standstreifens mittig beprobt, um eine für die Herstellung der Spaltzugprobekörper erforderliche Mindestschichtdicke der Waschbetonschicht von 60 mm garantieren zu können. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass die im Rahmen der Bohrkernentnahme zu beprobenden Fahrbahnplatten im Oberflächenbereich keine optischen Auffälligkeiten aufwiesen, wie sie beispielsweise durch die Ausbildung von Rüttelgassen während des Herstellungsprozesses entstehen können.

Im Anschluss an die Streckenbegehung erfolgte die Entnahme von Bohrkernen der jeweiligen Streckenabschnitte. Die Bohrkernentnahme der einzelnen Entnahmestellen erfolgte in der 28. KW (Prüflos 4), 32. KW (Prüflos 5), 36. KW (Prüflos 6) sowie in der 40. KW (Prüflos 7) des Jahres 2011.



**Abbildung 12:** Bohrkernentnahme aus einer Fahrbahnplatte (Prüflos 7, BAB A38, Südumfahrung Leipzig)



**Abbildung 13:** Entnahmeplan der Platte 294, BAB A11, km 44,0 + 45, Entnahmestelle Chorin (Prüflos 4)

Die Entnahme der Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm erfolgte mittels mobiler Kernbohrtechnik (Abbildung 11). Hierzu wurde vor Bohrbeginn ein Raster der jeweiligen Entnahmepunkte auf die Fahrbahnplatte aufgesprüht (siehe Abbildung 12). Die Abmessungen des Rasters wurden so gewählt, dass die Bohrkern untereinander einen seitlichen Abstand von 100 mm aufweisen und sich die jeweils äußeren Kerne im Abstand von 30 cm zum Plattenrand befinden (siehe Abbildung 13). Auf diese Weise konnte der Einfluss unzureichender Verdichtung im randnahen Bereich und das Anbohren von Dübeln im Bereich der Querscheinfugen verhindert werden. Zur Überprüfung der Plattenhomogenität wurden vor der eigentlichen Bohrkernentnahme 5 Bohrkern auf mögliche Gefügeinhomogenitäten untersucht (Abbildung 13). Hierzu wurden die Rohdichte der Bohrkern und ihr Eigenschwingverhalten (GrindSonic MK 5 „Industrial“) untersucht.

Die Entnahme der Bohrkern wurde vor Ort dokumentiert. Hierbei wurden die Lage der Bohrkern innerhalb der Fahrbahnplatte, Länge und Durchmesser der Bohrkern sowie an der Mantelfläche ersichtliche Gefügeinhomogenitäten, wie beispielsweise Verdichtungsfehler, dokumentiert.

Bohrkerne mit starken an der Oberfläche ersichtlichen Gefügeinhomogenitäten wurden vor Ort ausgesondert. Weitere Kriterien für eine Aussondierung waren:

- die im äußeren Bereich des Standstreifens eingeprägte Plattennummer
- Ankerstäbe im Bereich der Längsscheinfugen
- starke Ausbrüche in der Waschbetonschicht
- in der Bohrkronen festsetzende Bohrkern

Angaben zur Anzahl der je Prüflos ausgesonderten Bohrkern sind Tabelle 9 zu entnehmen. Aus Tabelle 9 ist ersichtlich, dass die Anzahl der ausgesonderten Bohrkern des Prüfloses 6 überdurchschnittlich hoch ist. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die beprobte Fahrbahnplatte partiell ausgeprägte Gefügeinhomogenitäten in Form starker Verdichtungsfehler des Unterbetons aufwies (Abbildung 14). Diese partiellen Verdichtungsfehler konnten durch die Probebohrung der Streckenbegehung nicht detektiert werden.



**Abbildung 14:** Bereich mit starkem Verdichtungsfehler des Unterbetons (BK 6-18, Prüflos 6)

Die zuvor erwähnten starken Ausbrüche im Bereich des Waschbetons traten vermehrt bei der Entnahme der Bohrkern des Prüfloses 5 auf. Im Bereich dieser Entnahmestelle bestand ein starker Haftverbund zwischen Betonfahrbahnplatte, verwendetem Vlies und hydraulisch gebundener Tragschicht (HGT). Der starke Haftverbund führte zu einem undefinierten Bruch der Bohrkern in der HGT (Abbildung 15), was wiederum die Entnahme der Bohrkern erschwerte. Infolge des Abrutschens der Bohrkernzange bei der Entnahme kam es zu verstärkten Ausbrüchen im oberen Bereich des Waschbetons.



**Abbildung 15:** Bohrkern mit Vlies und anhaftendem Teil der hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT)

## 5.4 Mörtelproben

Die statistische Auswertung der Daten des Ringversuchs zeigte, dass insbesondere bei der Prüfung der Bestandsbetone mit erheblichen Streuungen zu rechnen ist. Die im Vergleich zu den unter Laborbedingungen hergestellten Probekörpern höheren Streuungen der Bestandsbetone sind vermutlich überwiegend auf Streuungen der Materialeigenschaften zurückzuführen und lassen sich durch unterschiedliche Betonrezepturen, Herstellungstechnologien und Einbaubedingungen begründen. Mit der Variation dieser Einflussgrößen und der damit verbundenen Streuung der Materialeigenschaften ist unter realen Bedingungen des Bauprozesses jederzeit zu rechnen, was jedoch eine objektive Beurteilung der Präzision des Prüfverfahrens erheblich erschwert. In diesem Zusammenhang ist daher die Verwendung von Probekörpern mit geringen Streuungen der Materialeigenschaften anzustreben.

Die materialspezifischen Streuungen können durch die Verwendung von Mörtelproben erheblich reduziert werden. Dadurch wird eine objektive Beurteilung der Genauigkeit des Prüfverfahrens unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen ermöglicht.

### 5.4.1 Mörtelzusammensetzung

Für die Herstellung der Mörtelproben wurde ein eigens konzipierter Labormörtel mit einem Größtkorn von 4 mm verwendet. Der Einsatz eines solchen Labormörtels ermöglicht einerseits die Reduzierung des Einflusses der Gesteinskörnung durch die Begrenzung des Größtkorns auf 4 mm sowie andererseits eine Verminderung des Einflusses herstellungstechnologischer Randbedingungen aufgrund einer gezielten Steuerung der Frischmörtelkennwerten.

Durch die Verwendung eines Labormörtels mit sehr plastischer bis weicher Konsistenz soll der Einfluss des Verdichtungsprozesses und der dadurch eingebrachten Energie auf die Gefügehomoogenität (Verdichtungs-poren, Packungsdichte, etc.) verringert werden. Auf die Verwendung eines fließfähigen oder selbstverdichtenden Labormörtels wird aufgrund des möglichen Entmischens und der damit verbundenen Segregation der Gesteinskörnung verzichtet.

Für die Herstellung des Labormörtels wurde ein CEM I 42,5 N verwendet. Die Gesteinskörnung (Sandfraktion) wurde aus an der BAM verfügbaren Einzelfraktionen zusammengesetzt. Die verwendeten Einzelfraktionen werden seit Jahren nach speziellen Vorgaben der BAM aus einer hierzu festgelegten Förderstätte (Ottendorf-Okrilla) eines Herstellers bezogen. Somit sind eine konstante Qualität der Gesteinskörnung und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Die genaue Zusammensetzung des verwendeten Labormörtels ist Tabelle 11 zu entnehmen.

**Tabelle 11:** Zusammensetzung des Labormörtels des Prüfloses 8

Zement	Art		CEM I 42,5 N
	Gehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	495
w/z Wert			0,47
Gesteinskörnung (Quarzsand)	0/0,3	[Vol.-%]	17
	0/0,5		19
	0,5/1,0		14
	1,0/2,0		20
	2,0/4,0		30
Betonzusatzmittel	BV/FM	[kg/m <sup>3</sup> ]	2,97
	LP	[kg/m <sup>3</sup> ]	-

### 5.4.2 Frischmörtelkennwerte

Zur Dokumentation der Verarbeitungseigenschaften der Mörtelmischung über den Zeitraum der Probenherstellung wurden relevante Frischmörtelkennwerte zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Als Kennwerte wurden am frischen Mörtel das Ausbreitmaß entsprechend DIN-EN 1015-3:2007, die Frischmörtelrohddichte (in Anlehnung an DIN-EN 12350-6:2009) sowie der Luftporengehalt (in Anlehnung an DIN-EN 12350-7:2009) ermittelt. Zusätzlich wurde das Ausbreitmaß entsprechend DIN-EN 12350-5:2009 bestimmt, um einen Vergleich der Konsistenz des Mörtels mit den Ergebnissen der Frischbetonprüfung des Laborbetons zu ermöglichen. Die Ergebnisse des frischen Labormörtels sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Frischmörtelkennwerte des Labormörtels des Prüfloses 8

Charge	Prüfzeit	Proben Nr.	Ausbreitmaß [mm]		Frischmörtel- dichte [kg /m <sup>3</sup> ]	LP-Gehalt [Vol.-%]
			DIN-EN 1015-3	DIN-EN 12350-5		
1	t <sub>0</sub> + 5 min	A1 – A13	189	475	2316	1,8
	t <sub>0</sub> + 20 min	B1 – B13	173	440	2251	3,8
	t <sub>0</sub> + 40 min	-	167	430	-	-
2	t <sub>0</sub> + 5 min	D1 – D13	184	495	2313	1,9
	t <sub>0</sub> + 20 min	C1 – C13	182	465	2283	2,4
	t <sub>0</sub> + 40 min	-	181	450	2250	3,3
3	t <sub>0</sub> + 5 min	E1 – E13	193	500	2285	2,0
	t <sub>0</sub> + 20 min	F1 – F13	183	470	2264	3,0
	t <sub>0</sub> + 40 min	-	170	455	2268	3,9

t<sub>0</sub> - Mischbeginn (Wasserzugabe nach t<sub>0</sub> + 30 sec.)

### 5.4.3 Probekörperherstellung

Für die an den Mörtelproben geplanten Untersuchungen wurden insgesamt 87 Betonzylinder (78 reguläre Ringversuchsproben + 9 Rückstellproben) in 3 Chargen zu jeweils 90 Litern im Betonlabor der BAM hergestellt. Jede Charge umfasst dabei 26 reguläre Proben für den Ringversuch sowie 3 Rückstellproben. Die Betonage der Betonzylinder erfolgte, analog zum Laborbeton, entsprechend der in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Vorgehensweise. Direkt nach dem Anmischen der Mörtelprobe wurden die Frischbetonkennwerte der Mischung ermittelt (siehe Abschnitt 5.4.2) und anschließend die ersten 13 Probekörper hergestellt. Nach Herstellung der ersten 13 Proben erfolgte eine erneute Bestimmung der Frischmörtelkennwerte vor dem Herstellen der weiteren 13 Proben sowie der 3 Rückstellproben. Nach Herstellung aller Proben wurden die Frischmörtelwerte nochmals bestimmt, um die Verarbeitungseigenschaften der verwendeten Mörtelmischung über den gesamten Zeitraum der Probenherstellung zu dokumentieren.

In Analogie zu den entsprechenden Prüflosen des Laborbetons erfolgten die Probenvorbereitung und der Versand der Probekörper an die teilnehmenden Prüfstellen. Nähere Informationen zur Probekörpervorbereitung und dem Versand der Proben sind dem nachfolgenden Abschnitt 5.5 zu entnehmen.

## 5.5 Probekörpervorbereitung

Die Vorbereitung der Probekörper erfolgte einheitlich durch die BAM, um den Einfluss einer unterschiedlichen Probenvorbereitung bei den einzelnen Prüfstellen auszuschließen.

### 5.5.1 Herstellung der Probekörper

Nach dem Eingang der entnommenen Bohrkern der Prüflose 3-7 in der BAM wurden die entsprechenden Probekörper gemäß den Vorgaben der AL Sp-Beton gewonnen. Hierzu wurden die profilierten Stirnseiten entfernt und jeweils zwei Scheiben für die Spaltzugprüfung geschnitten. Die Dicke der Spaltzugscheiben betrug 50 mm. Der verbleibende Mittelteil diente zur Herstellung der Probekörper der Druckfestigkeitsprüfung. Dementsprechend wurden die Probekörper auf eine Länge von 100 mm geschnitten und die Stirnseiten planparallel geschliffen. Die Bezeichnung der Probekörper erfolgte entsprechend des in Abbildung 16 dargestellten Schemas und gliedert sich wie folgt:

- x - Nummer des Prüfloses
- yyy - Bohrkernnummer
- .1 - Spaltzugfestigkeit Unterbeton
- .2 - Druckfestigkeit Unterbeton
- .3 - Spaltzugfestigkeit Waschbeton

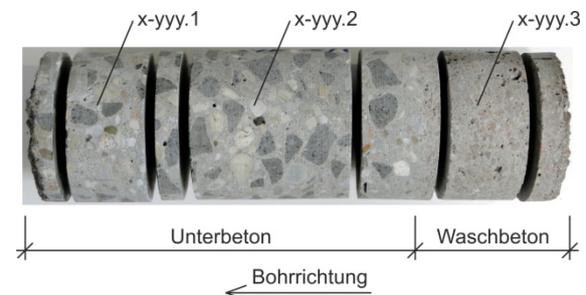


Abbildung 16: Bezeichnung der Probekörper entsprechend ihrer Lage im Bohrkern

### 5.5.2 Lagerung und Versand

Die Lagerung der hergestellten Zylinder der Prüflose 1, 2 und 8 erfolgte bis zum Schneiden der Proben gemäß DIN-EN 12390-2:2009 bei einer Temperatur von  $20 \pm 2$  °C unter Wasser. Nach dem 14. Tag der Herstellung wurden aus den Zy-

lindern die erforderlichen Probekörper entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton geschnitten. Die gewonnenen Probekörper wurden bis zum Versand und der anschließenden Prüfung unter Wasser gelagert. Der Versand der Proben erfolgte im feuchten Zustand in entsprechend versiegelten Transportbehältern.

Die Probekörper der Prüflose 3-7 wurden bis zum Versand an die teilnehmenden Prüfstellen bei Normklima ( $20 \pm 2 \text{ °C}$  und  $65 \pm 5 \%$  relativer Luftfeuchte) in der BAM gelagert. Gleiche Lagerungsbedingungen sollten auch durch die Prüfstellen gewährleistet werden. Der Versand der Proben erfolgte 14 Tage nach Beendigung der Probenvorbereitung. Der Termin zur Prüfung der Prüflose 4-7 wurde einheitlich auf 5 Wochen nach der Entnahme der Bohrkernproben festgelegt. Die Proben des Prüfloses 3 wurden 60 Tage nach Herstellung der Platte geprüft.

### 5.5.3 Zulosung der Probekörper

Die Zulosung der Probekörper zu den einzelnen Prüfstellen erfolgte durch einen Zufallsgenerator. Hierzu wurden die nach der Probenvorbereitung verbleibenden Probekörper fortlaufend in Gruppen zu je 13 Probekörpern zusammengefasst und durch den Zufallsgenerator den einzelnen Prüfstellen zugewiesen.

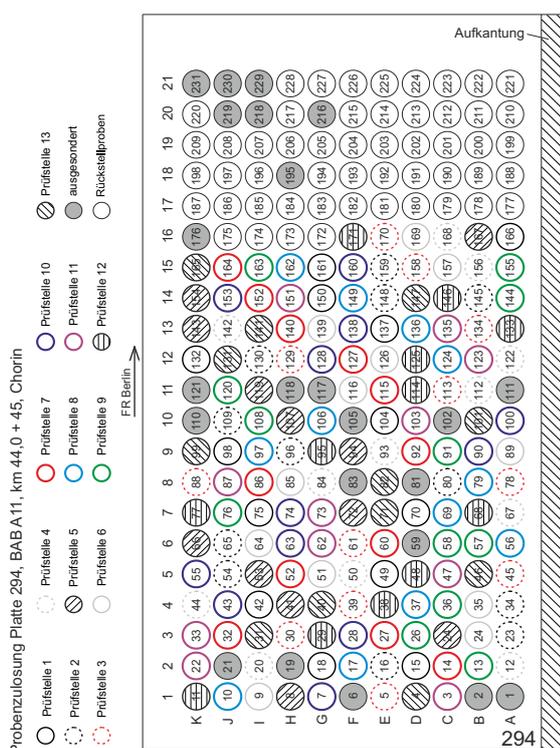


Abbildung 17: Zulosung der Proben des Prüfloses 4 (Platte 294, BAB A11, km 44,0 + 45)

## 5.6 Standardarbeitsanweisung

Zur Sicherstellung einheitlicher und vergleichbarer Prüfbedingungen wurde durch die BAM, in enger Zusammenarbeit mit dem zuständigen Betreuungsausschuss, eine Standardarbeitsanweisung zur Durchführung der Spaltzugprüfung erarbeitet. Die Standardarbeitsanweisung beinhaltet zusätzliche Hinweise und Maßnahmen als Ergänzung der AL SP-Beton [ALSP 2006].

### 5.6.1 Vorbereitende Arbeiten

Die Probekörper sind nach Probeneingang einer visuellen Begutachtung zu unterziehen, um Unregelmäßigkeiten oder Transportschäden festzustellen. Festgestellte Unregelmäßigkeiten sind im Prüfprotokoll anzugeben.

Die Masse und Abmessungen der Probekörper sind jeweils nach Probeneingang bzw. vor der Prüfung zu bestimmen. Die Bestimmung der Durchmesser und Höhen erfolgt gemäß DIN-EN 12390-3:2009, Anhang B. Probekörper deren Maße oder Formen nicht den Anforderungen der AL Sp-Beton [ALSP 2006] bzw. der DIN-EN 12390-3:2009 entsprechen oder Transportschäden aufweisen, müssen zurückgewiesen werden.

### 5.6.2 Lagerung der Proben

Entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006] wurden zwei Lagerungsbedingungen für die Lagerung der Proben in den einzelnen Prüfstellen definiert. Die Bedingungen für die Lagerung der aus Laborprüfkörpern hergestellten Scheiben (Prüflos 1, 2 und 8) bzw. der aus Bohrkernen gewonnenen Scheiben entspricht der bereits in Abschnitt 5.5.2 beschriebenen Lagerung der Proben in der BAM.

### 5.6.3 Anforderungen an zu verwendende Prüfmittel und Geräte

An die im Rahmen des Ringversuchs verwendeten Prüfmittel und Geräte wurden nachfolgende Anforderungen gestellt:

- Klimaraum mit einer Temperatur von  $20 \pm 2 \text{ °C}$  und einer relativen Luftfeuchte von  $65 \pm 5 \%$
- Behälter zur Wasserlagerung der Proben mit einer Wassertemperatur von  $20 \pm 2 \text{ °C}$

- c) Druckprüfmaschine gemäß DIN-EN 12390-4: der Genauigkeitsklasse 1
- d) Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01$  g
- e) Messschieber mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm
- f) Spaltzugprüfeinrichtung gemäß AL SP-Beton [ALSP 2006]
- g) Filzstreifen mit einer Härte H1 gemäß AL SP-Beton [ALSP 2006]

#### 5.6.4 Durchführung der Prüfung

Für die Durchführung der Spaltzugprüfung gemäß AL SP-Beton [ALSP 2006] wurden nachfolgende Schritte vereinbart:

1. Zentrisches Ausrichten der Spaltzugprüfvorrichtung auf der unteren Druckplatte der Prüfmaschine.
2. Einlegen der Filzstreifen in die Spaltzugprüfvorrichtung. Die Filzstreifen dürfen nur einmal verwendet werden.
3. Einsetzen der Zylinderscheibe in die Prüfvorrichtung. Ausrichten der Zylinderscheibe mit Hilfe der Zentriervorrichtung.
4. Belasten der Probe mit einer Kraft von  $0,39 \pm 0,07$  kN.
5. Einmalige Bestimmung der Federkraft der Spaltzugvorrichtung vor Durchführung der ersten Prüfung des jeweiligen Prüfloses.
  - Zylinderscheibe entlasten, indem der Abstand der Lasteinleitungsstreifen in Wegregelung um 1 mm vergrößert wird.
  - Nullsetzen der Kraftanzeige.
  - Erneutes Belasten der Zylinderscheibe mit einer Kraft von  $0,39 \pm 0,07$  kN.
6. Entfernen der Zentriervorrichtung (falls erforderlich).
7. Stoßfreies, kontinuierliches Belasten der Zylinderscheibe mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $0,39 \pm 0,07$  kN/s. Die Belastung darf nicht unterbrochen werden. Bereits belastete, aber nicht gebrochene Proben dürfen nicht erneut geprüft werden.
8. Aufzeichnen der Bruchlast im Prüfprotokoll.
9. Beurteilung des Bruchbildes anhand des für den Ringversuch bereitgestellten Prüfprotokolls.

Die Bestimmung der Federkraft der Spaltzugvorrichtung kann auch ohne eingesetzte Zylinderscheibe durchgeführt werden. Die Messung der Kraft bzw. das Nullsetzen der Kraftanzeige erfolgt dann bei einem Laststreifenabstand, der sich bei einer Belastung der Zylinderscheibe mit  $0,39 \pm 0,07$  kN einstellt. Je nach Art der verwendeten Prüfmaschine und Spaltzugvorrichtung muss die Federkraft nur bestimmt werden, wenn der Prüfaufbau verändert wurde oder die Prüfungen für längere Zeit unterbrochen wurden.

Nach AL SP-Beton [ALSP 2006] sind die Zylinderscheiben mit einer Grundbelastung von  $0,05 \pm 0,01$  N/mm<sup>2</sup> bzw. einer Belastungsgeschwindigkeit von  $0,05 \pm 0,01$  N/mm<sup>2</sup>·s zu belasten. Die daraus resultierende Kraft von  $0,39 \pm 0,07$  kN bzw. die Belastungsgeschwindigkeit von  $0,39 \pm 0,07$  kN/s wurde für Zylinderscheiben mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 50 mm berechnet.

Die Druckfestigkeit des Betons wird an einem Mittelstück des Bohrkerns bzw. Zylinders, aus dem die Spaltzugproben gewonnen wurden, bestimmt. Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN-EN 12390-3:2009.

#### 5.6.5 Aufzeichnungen / Rohdaten

Die ermittelten Abmessungen, Massen und Bruchlasten sind in das für den Ringversuch bereitgestellte Prüfprotokoll mit folgenden Genauigkeiten einzutragen:

- Abmessungen: 0,1 mm
- Masse: 0,01 g
- Bruchkraft: 0,01 kN

Nach Möglichkeit ist der Kraftverlauf während der Prüfung aufzuzeichnen.

#### 5.6.6 Angaben zur Messunsicherheit

Im Protokoll sind die Bezeichnung der verwendeten Prüfmaschine und die bei der letzten Kalibrierung ermittelte Genauigkeitsklasse der Kraftmess-einrichtung im verwendeten Messbereich anzugeben. Das Datum der letzten Kalibration darf nicht länger als ein Jahr zurückliegen.

## 6 Statistische Auswertung der Prüfergebnisse nach klassischem Verfahren

### 6.1 Vorgehensweise

Die Grundlage für die statistische Auswertung bildete zunächst die Plausibilitätsprüfung aller prüflosspezifischen Prüfergebnisse der Prüfstellen in der BAM. Anschließend erfolgte die Auswertung der Prüfergebnisse des Ringversuchs mit dem klassischen Verfahren entsprechend den Vorgaben des Entwurfs des Teils 4 „Auswertung von Ringversuchen“ des FGSV-Merkblattes „Statistische Auswertung von Prüfergebnissen“ [FGSV 2011]. So wurde zunächst die Streuung der Einzelwerte mittels Mandel's h- und k-Werten für jedes Prüflos visualisiert. Dies ermöglicht eine erste Identifikation von Auffälligkeiten und Unverträglichkeiten. Zur Entscheidung, ob es sich dabei um einen Ausreißer handelt, wurde der Grubbs- und Cochran-Test durchgeführt. Die so erfolgte Datenbereinigung bildete die Grundlage für die prüfstellenspezifische Ermittlung der statistischen Kennzahlen bei den einzelnen Prüflosen unter Vergleich- und Wiederholbedingungen. Diese wiederum erlauben Rückschlüsse auf die Präzision des Prüfverfahrens.

### 6.2 Plausibilitätsprüfung der übermittelten Prüfergebnisse

Die Prüfergebnisse aller Prüfstellen bei den einzelnen Prüflosen sind tabellarisch in der Anlage aufgeführt. Dabei wurden die bereits bei der Plausibilitätsprüfung in der BAM identifizierten Fehler in den von den Prüfstellen zugesandten Daten partiell korrigiert. Die korrigierten Daten sind in den Tabellen farbig hinterlegt. Zusätzlich sind zur besseren Nachverfolgung hinter den korrigierten Werten die Ursprungsdaten in Klammern aufgeführt. Einen Überblick über die bei der Plausibilitätsprüfung ermittelten prüfstellenspezifischen Auffälligkeiten bei den einzelnen Prüflosen gibt Tabelle 13. Dabei wird zwischen möglichen Fehlern durch eine verspätete Prüfung, Ausführungsfehlern bei der Kalibrierung und der direkten Spaltzugprüfung sowie Übertragungs- und Tippfehlern durch eine unzureichende Endkontrolle durch den Prüfstellenleiter unterschieden. Tippfehler bei der Übertragung der Probekörperbezeichnung oder falsche Masseangaben zu den Probekörpern sind in der Spalte Sonstiges berücksichtigt. Die in der Tabelle 13 farbig hinterlegten Fehler wurden in den Tabellen der Anlage korrigiert.

Tabelle 13: Prüfstellenspezifische Auffälligkeiten der erhaltenen Messwerte

Prüflos	Prüfstellenspezifische Auffälligkeiten der erhaltenen Messwerte					
	Terminverzug	Ausführungsfehler bei		Unzureichende Endkontrolle		Sonstiges
		Kalibrierung	SZ-Prüfung	Übertragungsfehler	Tippfehler	
1	2	-	11	-	-	2, 7, 8, 6
2	2	-	-	-	-	2
3	2	-	-	-	1	2
4	1	2	-	-	2, 4, 9	2
5	1	-	-	7	3	-
6	1	-	-	6, 7	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-

korrigiert im Vorfeld der statistischen Auswertung

Die in Tabelle 13 aufgelisteten Auffälligkeiten sind im Hinblick auf ihren Einfluss auf die ermittelten Festigkeiten unterschiedlich zu bewerten. So ist beispielsweise im Fall des nicht eingehaltenen Prüftermins der Prüfstelle 2 beim Prüflos 1 (Laborbeton) eine über dem Mittelwert aller Prüfstellen liegende Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit erkennbar, da der angesetzte Prüftermin zur Ermittlung der 28 Tagefestigkeit um 8 Tage überschritten wurde. Die Überschreitung des Prüfter-

mins der Prüfstelle 2 beim Prüflos 2 um einen Tag hatte, ebenso wie die Unterschreitung beim Prüflos 3, keine auffallende Auswirkung auf die Spaltzug- bzw. Druckfestigkeit. Zu einer Überschreitung der vorgegebenen Prüftermine kam es ebenso bei der Prüfstelle 1 in den Prüflosen 4 – 6 (Bestandsbeton). Grund hierfür war der krankheitsbedingte Ausfall des mit der Spaltzugprüfung beauftragten Laboranten, so dass die betreffenden Probekörper durch den zuständigen Mitarbeiter

erst zu einem späteren Zeitpunkt geprüft wurden. Aufgrund des Alters der jeweiligen Proben des Bestandsbetons ist davon auszugehen, dass die verspätete Prüfung der Proben keinen markanten Einfluss auf die ermittelten Festigkeitswerte hat.

Im Gegensatz zur nicht termingerechten Prüfung der Proben hatten Ausführungsfehler bei der Durchführung der Spaltzugprüfung einen deutlich größeren Einfluss auf die Ergebnisse. Unter anderem kam es im Rahmen der Spaltzugprüfung des Prüfloses 1 zu einer nicht korrekten Anwendung des Spaltzugrahmens der Prüfstelle 11. Im Rahmen des Audits der betreffenden Prüfstelle zeigte sich, dass die Leichtgängigkeit der oberen Lagerung der Lasteinleitungsschiene nicht gewährleistet war, so dass es bei der Spaltzugprüfung des Prüfloses 1 vermutlich zu einer Schiefstellung der Lasteinleitungsschiene kam. Die verursachte Kantenpressung resultierte in deutlich geringeren Festigkeitswerten. Eine mögliche Schiefstellung der oberen Lasteinleitungsschiene wurde bei den nachfolgenden Prüflosen durch das Einlegen eines Probekörpers mit einer Länge von 150 mm und dem Anfahren eines geringen Lastniveaus korrigiert, so dass die obere und untere Lasteinleitungsschiene parallel zueinander verlaufen. Rückstellproben des Prüfloses 1 wurden entsprechend dieser Vorgehensweise durch die Prüfstelle 11 im Alter von 42 Tagen mit höheren Festigkeiten geprüft.

Als weiterer Ausführungsfehler ist die Verwendung einer falschen Kalibrierdatei durch die Prüfstelle 2 im Prüflos 4 zu nennen. Hierdurch wurden durch die Prüfstelle zu geringe Festigkeitswerte bei der Spaltzugprüfung ermittelt. Die zugehörigen Druckfestigkeiten stimmen jedoch mit den Mittelwerten der übrigen Prüfstellen überein, da die Bestimmung der Druckfestigkeit auf einer anderen Prüfmaschine erfolgte.

Neben den beobachteten Ausführungsfehlern wurden auch zahlreiche Tipp- und Übertragungsfehler festgestellt. Der gravierendste Übertragungsfehler zeigte sich bei der Prüfstelle 7 im Prüflos 5. Hier wurde durch die Prüfstelle für die Übermittlung der Daten das Protokoll des Prüfloses 4 als Vorlage verwendet. Beim Übertragen der Messwerte wurden jedoch nur die Probekörperabmessungen aktualisiert, so dass die Berechnung der entsprechenden Festigkeitswerte unter Verwendung der Bruchlasten des Prüfloses 4 erfolgte. Hiervon sind sowohl die Werte der Spaltzugfestigkeit als auch die Werte der Druckfestigkeit betroffen. Des Weiteren wurden durch die Prüfstelle 7 im Protokoll zur Druckfestigkeit des Prüfloses 6 die Werte des Durchmessers und der Höhe vertauscht. Infolge-

dessen erhöht sich die mittlere Druckfestigkeit der Prüfstelle 7 um 3,7 N/mm<sup>2</sup> bei Verwendung der korrekten Werte.

Neben den zuvor erläuterten Ausführungs- und Übertragungsfehlern kam es bei einzelnen Probekörpern zu zahlreichen Tippfehlern, die einen direkten Einfluss auf die berechneten Spaltzugfestigkeiten oder Rohdichten haben (siehe

Tabelle 13). Unter den Punkt „Sonstige“ wurden Tippfehler der Probekörperbezeichnung (Prüfstelle 7, Prüflos 1), identische Probekörperbezeichnungen (Prüfstelle 8, Prüflos 1), fehlende Probeneingangsdaten (Prüfstelle 6, Prüflos 1) sowie die fehlende Messung der Proben vor der jeweiligen Prüfung durch die Prüfstelle 2 aufgeführt. Im letzteren Fall wurde durch die Prüfstelle 2 keine zweite Messung vor der Prüfung durchgeführt, sondern die Daten des Probeneingangs in das jeweilige Prüfprotokoll kopiert.

### 6.3 Beurteilung der Streuung der Einzelwerte anhand von Mandel's h- und k-Werten

#### 6.3.1 Grundlagen

Die nachfolgenden Ausführungen zu den h- und k-Werten von John Mandel sind dem Abschnitt 10.3 des derzeitigen Entwurfs des Teil 4 „Auswertung von Ringversuchen“ des FGSV-Merkblattes „Statistische Auswertung von Prüfergebnissen“ [FGSV 2011] entnommen.

Anhand der h- und k-Werte können die Prüfstellenmittelwerte bzw. -varianzen auf grafische Weise direkt verglichen werden. Sie eignen sich insbesondere dazu, Auffälligkeiten und Unverträglichkeiten bezüglich der Streuung der Ergebnisse zu erkennen und sind daher bei der Beurteilung der Labore hilfreich. Eine Identifikation oder Elimination von Daten als Ausreißer kann durch die h- und k-Werte nicht erfolgen. Zur Identifikation von Ausreißern wurden daher der Grubbs sowie der Cochran-Test durchgeführt.

Die h-Werte  $h_{ij}$  der Prüfstellen  $j$  ( $j = 1, \dots, q$  mit  $q = 13$ ) eines Messniveaus  $i$  ( $i = 1, \dots, p$  mit  $p = 8$ ) sind definiert als Differenz der Prüfstellenmittelwerte  $\bar{x}_{ij}$  vom Gesamtmittelwert  $\bar{x}_i$  aller Prüfstellen, gemessen in Vielfachen der Standardabweichung  $s_i$  der Prüfstellenmittelwerte  $\bar{x}_{ij}$ . Demnach errechnen sich die h-Werte  $h_{ij}$  der Prüfstellen  $j$  eines Messniveaus  $i$  (Prüflos) gemäß Gleichung (1) zu:

$$h_{ij} = \frac{\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i}{s_i} \quad (1)$$

mit den Prüfstellenmittelwerten  $\bar{x}_{ij}$  aller  $n$  Ergebnisse  $x_{ijl}$  ( $l = 1, \dots, n$  mit  $n = 6$  für Prüflös 1, 2 und 8 bzw.  $n = 12$  für Prüflös 3 bis 7)

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \bar{x}_{ijl} \quad (2)$$

und dem Gesamtmittelwert  $\bar{x}_i$  aller  $j$  Prüfstellen

$$\bar{x}_i = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \bar{x}_{ij} \quad (3)$$

sowie der Standardabweichung  $s_i$  der Labormittelwerte  $\bar{x}_{ij}$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{q-1} \sum_{j=1}^q (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (4)$$

Die grafische Darstellung der  $h$ -Werte erlaubt eine direkte Visualisierung bestehender Auffälligkeiten der Messwerte. Zur Beurteilung, ob eine Auffälligkeit statistisch signifikant ist, sind in den Abbildungen der  $h$ -Werte die kritischen Grenzen des Signifikanzniveaus  $\alpha = 5\%$  und  $\alpha = 1\%$  als horizontale Linien eingezeichnet. Überschreitet der  $h$ -Wert die 95 %- bzw. 99 %-Grenze, dann wird die Nullhypothese „Der  $h$ -Wert unterscheidet sich rein zufällig vom Wert Null“ verworfen. Falls diese Nullhypothese gilt, wird sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % bzw. 1 % fälschlicherweise verworfen (zurückgewiesen). Diese Fehlentscheidung wird durch Vorgabe des Signifikanzniveaus  $\alpha = 5\%$  bzw.  $\alpha = 1\%$  auf maximal 5 % bzw. 1 % begrenzt. Für die Beurteilung der Auffälligkeiten bedeutet dies, dass die Grenzlinie bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  als „Warnlinie“ und bei  $\alpha = 1\%$  als „kritische Linie“ zu interpretieren ist. Ein  $h$ -Wert außerhalb der eingezeichneten Grenzlinien bedeutet, dass die Abweichung  $(\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i)$  zum betreffenden Signifikanzniveau signifikant vom Wert Null verschieden ist und mit entsprechenden Ausreißertests untersucht werden sollte.

Im Gegensatz zu den  $h$ -Werten, die die Abweichung der Labormittelwerte  $\bar{x}_{ij}$  vom Gesamtmittelwert  $\bar{x}_i$  aller Prüfstellen  $j$  ( $j = 1, \dots, 13$ ) als Vielfaches der Standardabweichungen  $s_i$  der Labormittelwerte  $\bar{x}_{ij}$  veranschaulichen, geben die  $k$ -Werte einen Überblick über die Varianz der Ergebnisse  $x_{ijk}$  eines Messniveaus  $i$  ( $i = 1, \dots, 8$ ). Der  $k$ -Wert  $k_{ij}$  ist demnach definiert als der Quotient aus der Standardabweichung  $s_{ij}$  eines Labors (Prüfstelle) und  $\bar{s}_i$  als Wurzel des Mittelwertes aller Prüfstellenvarianzen eines Messniveaus  $i$  (Prüflös) und errechnet sich entsprechend Gleichung (5) zu:

$$k_{ij} = \frac{s_{ij}}{s_i} \quad (5)$$

mit

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{l=1}^n (x_{ijl} - \bar{x}_{ij})^2} \quad (6)$$

und

$$\bar{s}_i = \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q s_{ij}^2} \quad (7)$$

Wie bereits zuvor erwähnt, können aufgrund der grafischen Darstellung der  $h$ - und  $k$ -Werte eventuelle Ausreißer nicht identifiziert oder eliminiert werden. Hierzu ist die Durchführung entsprechender Ausreißertests notwendig. Anhand des Grubbs-Tests können Messwerte oder Prüfstellen mit großen Abweichungen zum Mittelwert identifiziert werden, die auch im Widerspruch zur angenommenen Normalverteilung der Messwerte stehen könnten.

Im Gegensatz zum Grubbs-Test werden durch den Cochran-Test Prüfstellen mit einer signifikant erhöhten Prüfstreuung ermittelt. Hierbei handelt es sich um Prüfstellen, bei denen die Prüfung unter Wiederholbedingungen eine auffällig große Streuung aufweist. Nähere Informationen zur Identifikation von Ausreißern sind dem Abschnitt 6.4 zu entnehmen.

### 6.3.2 Spaltzugfestigkeit

Einen optischen Eindruck der prüfstellenspezifisch ermittelten Einzel-,  $h$ - und  $k$ -Werte der Spaltzugfestigkeit für das jeweilige Prüflös vermitteln Abbildung 18 bis Abbildung 24. Im oberen Diagramm der jeweiligen Abbildung sind neben den prüfstellenspezifischen Einzelwerten zusätzlich die Mittelwerte der Einzelwerte jeder Prüfstelle als auch der Mittelwert aller Prüfstellen aufgetragen. In den jeweils darunter befindlichen Diagrammen sind zur Bewertung der Auffälligkeiten bei den  $h$ - und  $k$ -Werten in Abhängigkeit des Signifikanzniveaus die „Warnlinie“ (5%, gelbe Linie) und die „kritische Linie“ (1%, rote Linie) dargestellt.

Eine vergleichende Betrachtung der Diagramme der Prüflöse 1 und 2 mit dem in zwei Chargen im Transportbetonwerk für die Erstprüfung hergestellten Laborbeton in Abbildung 18 zeigt, dass insbesondere beim Prüflös 1 der  $h$ -Wert der Prüfstelle 11 als kritisch zu betrachten ist. Dies zeigt, dass der Mittelwert dieser Prüfstelle stark vom Gesamtmittelwert abweicht. Wie bereits im Abschnitt 6.2

ausgeführt, ist dies auf eine unsachgemäße Bedienung des Spaltzugrahmens zurückzuführen. Bemerkenswert ist dabei, dass dieser Umstand

keine signifikanten Auswirkungen auf die Prüfvarianz ausübt.

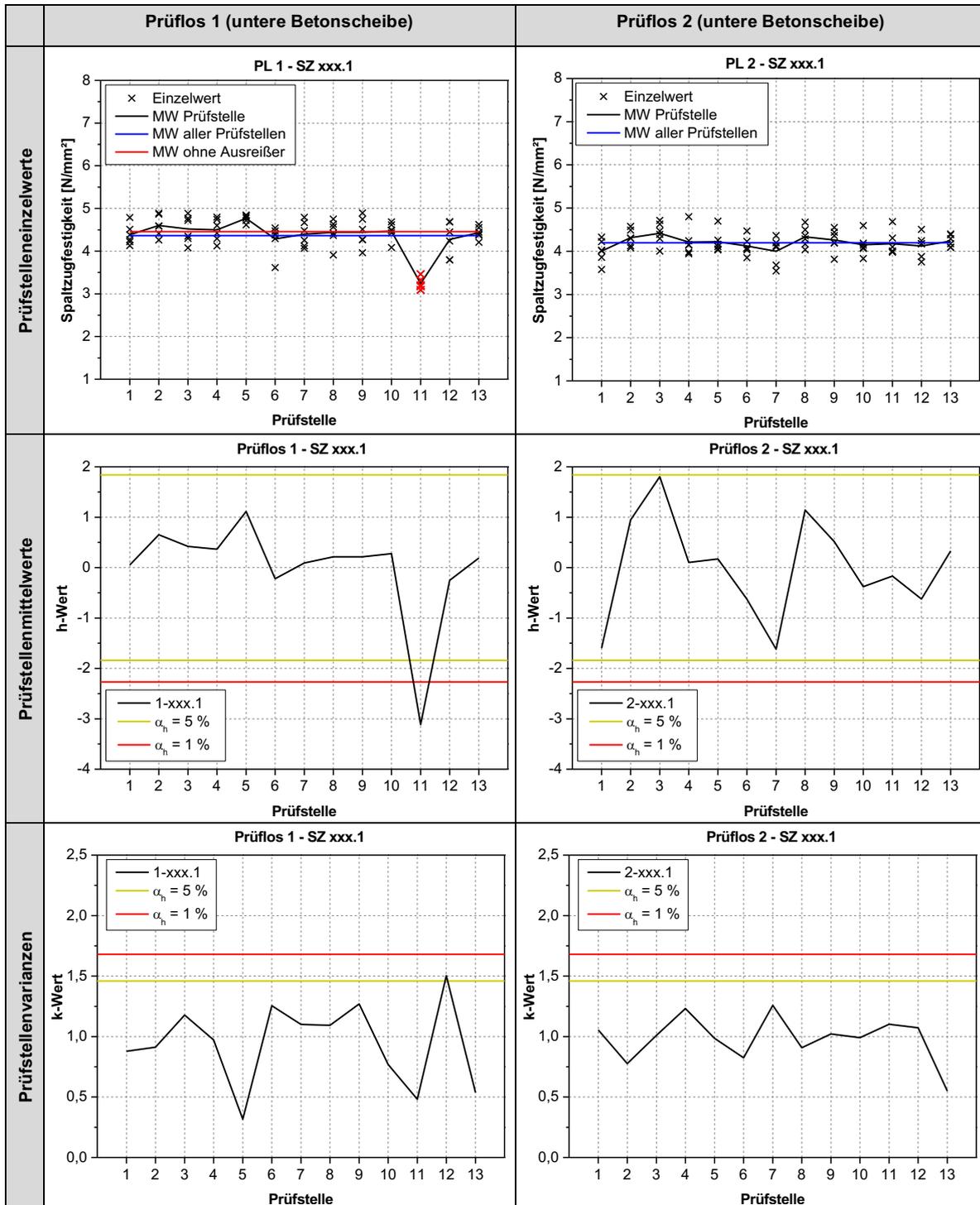


Abbildung 18: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Spaltzugfestigkeit der Prüflöse 1 und 2 (Laborbeton, Erst-/ Eignungsprüfung im Transportbetonwerk)

Auch bei der Übereinstimmungskontrolle der Spaltzugfestigkeit der aus der Versuchsplatte entnommenen Bohrkern (Prüflös 3) ist die Prüfstelle 11 auffällig. So ist den in der Abbildung 19 dargestellten h-Werten zu entnehmen, dass der für die-

se Prüfstelle bestimmte Mittelwert den Gesamtmittelwert ebenfalls signifikant unterschreitet. Dies ist wiederum auf eine Fehlbedienung des Spaltzugrahmens zurückzuführen. Das prüfstellenspezifisch ermittelte k-Wert-Diagramm der unteren Be-

tonscheibe zeigt, dass die Prüfstelle 12 gegenüber den anderen Prüfstellen eine signifikant erhöhte Prüfstreuung aufweist. Die Ursache für das Auftre-

ten des erhöhten Einzelwertes konnte jedoch nicht ermittelt werden.

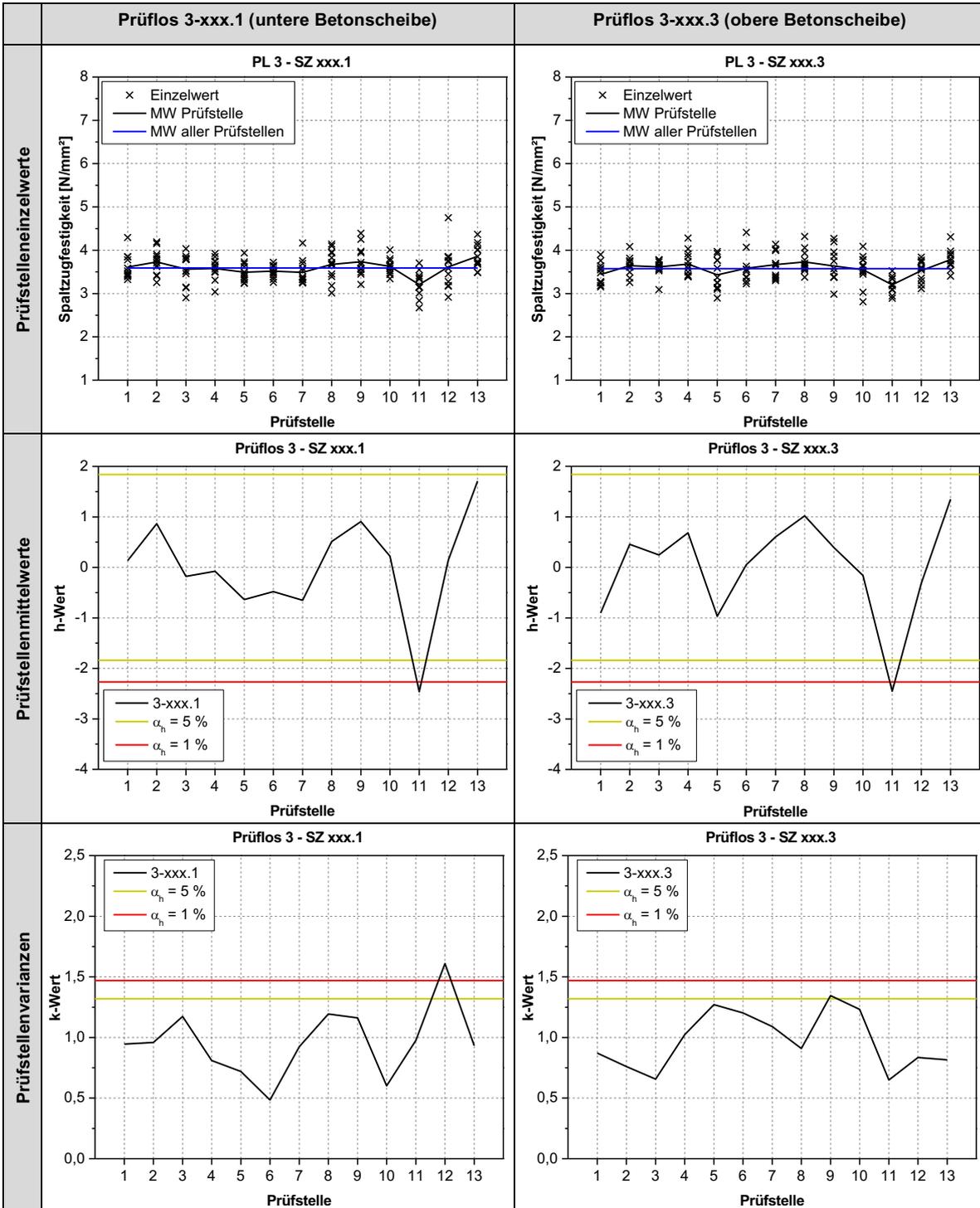


Abbildung 19: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Spaltzugfestigkeit des Prüflinges 3 (Laborbeton, Übereinstimmungskontrolle der Versuchsplatte Rastplatz „Kersdorfer See“)

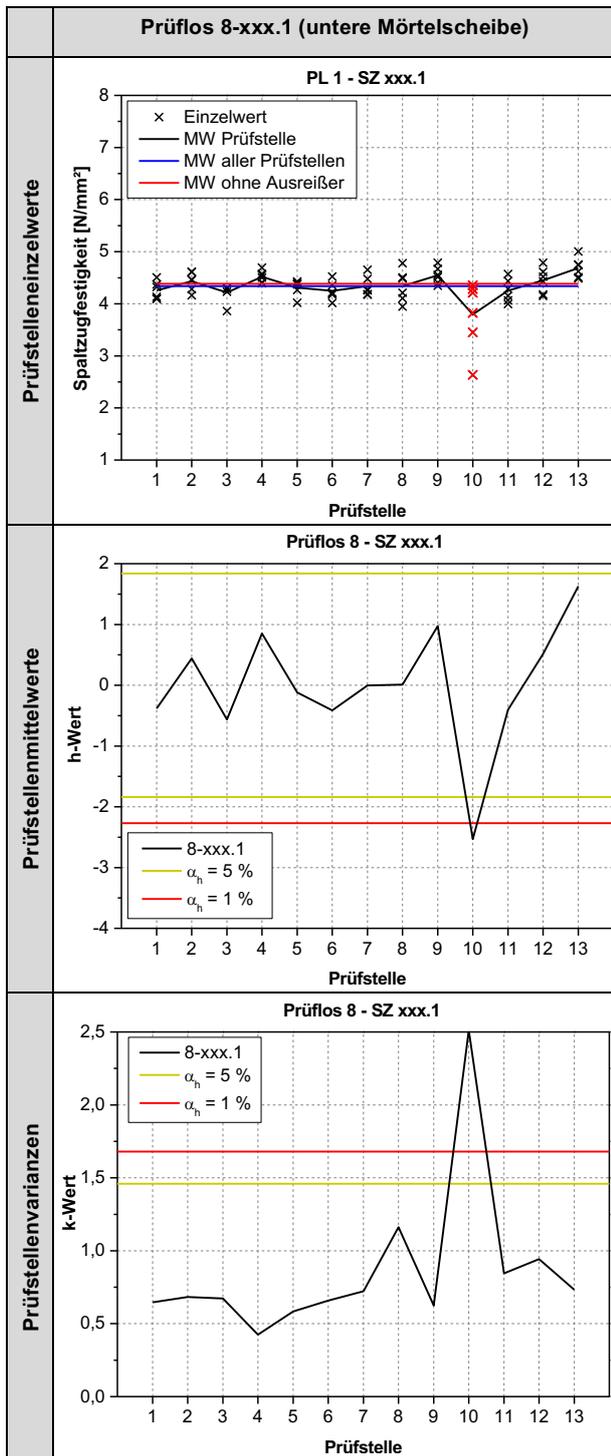


Abbildung 20: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzelh- und k-Werte der Spaltzugfestigkeit des Prüfloses 8 (Labormörtel, Minimierung Materialeinfluss)

Das Ergebnis der Erstprüfung der Spaltzugfestigkeit an der unteren Scheibe des Labormörtels veranschaulicht die Abbildung 20. Bereits die prüfstellenspezifische Darstellung der Einzelwerte zeigt, dass sich die Prüfstreuung bei allen Prüfstellen mit Ausnahme der Prüfstelle 10 durch die Homogenisierung des Materials infolge der Minimierung des Größtkorns stark vermindert. Die Ursache für das Auftreten der beiden geringen Einzelwerte, die zu der signifikanten Unterschreitung des Mittelwertes dieser Prüfstelle gegenüber dem Mittelwert aller anderen Prüfstellen sowie zu einer vergleichsweise sehr hohen Prüfstreuung führt, konnte nicht ermittelt werden. Auffallend war, dass in beiden Fällen ein irreguläres Bruchbild auftrat.

Die Abbildung 21 bis Abbildung 24 geben Aufschluss über die Ergebnisse der Spaltzugprüfungen an der unteren und oberen Scheibe der Bohrkern der Bestandsbetone. Sie bilden die Grundlage für die Beurteilung der Präzision des Prüfverfahrens bezüglich der zukünftig vorgesehenen Restsubstanzbewertung. Bei einer vergleichenden Betrachtung der am Labor- und Bestandsbeton gewonnenen Ergebnisse ist erkennbar, dass hier tendenziell die Einzelwerte bei den jeweiligen Prüfstellen eine größere Prüfstreuung aufweisen.

Die in Abbildung 21 dargestellten h-Werte zeigen, dass insbesondere beim Prüflös 4 die Spaltzugfestigkeitsergebnisse der Prüfstelle 2 kritisch zu hinterfragen sind. So unterschreitet bei dieser Prüfstelle sowohl der an der unteren als auch an der oberen Betonscheibe bestimmte Mittelwert der

Spaltzugfestigkeit den Gesamtmittelwert aller Prüfstellen. Ursächlich hierfür ist die Verwendung eines falschen Prüfprotokolls durch die Prüfstelle. Die k-Werte hingegen lassen bei diesem Prüflös auf keine erhöhten Prüfstreuungen einzelner Prüfstellen schließen.

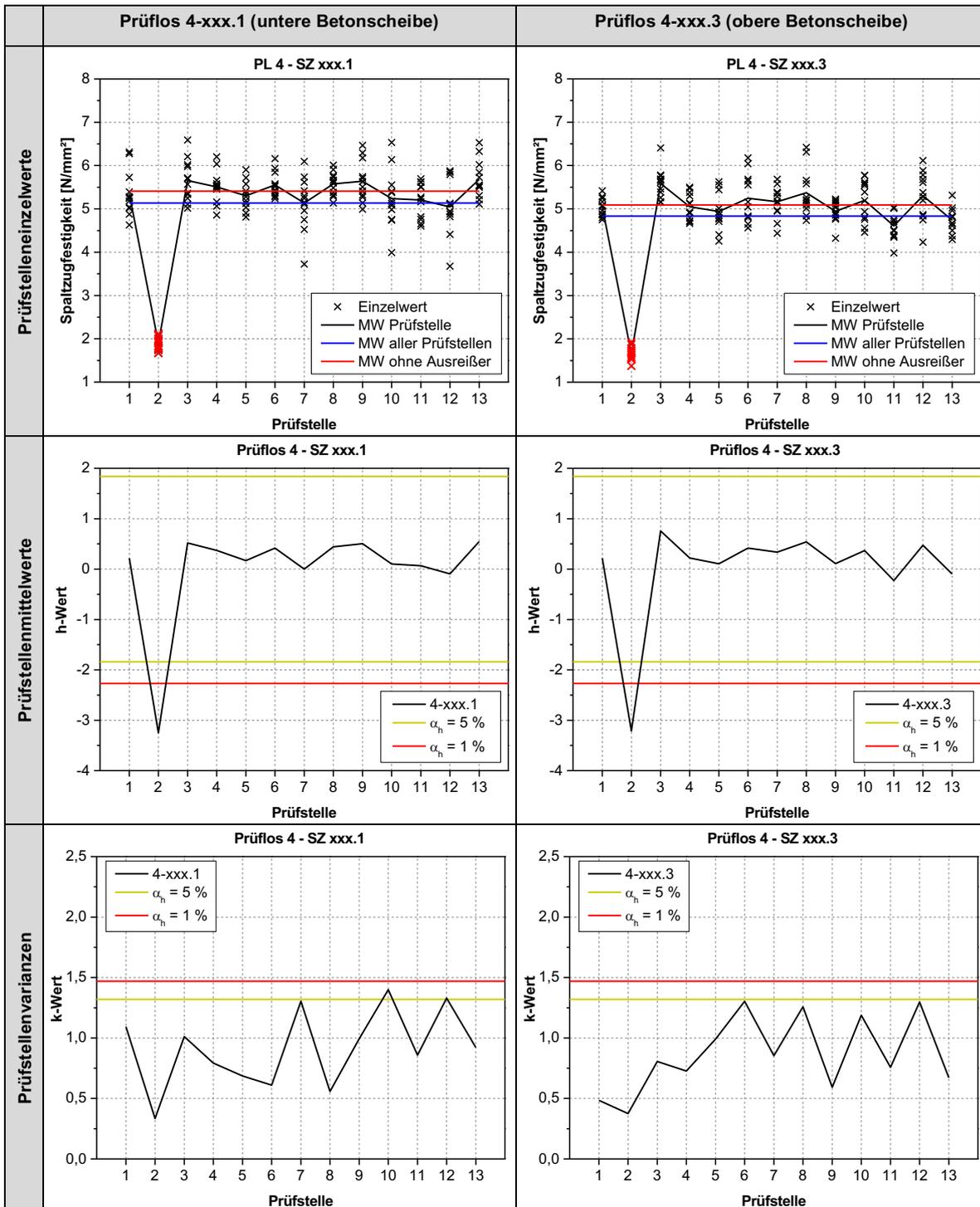


Abbildung 21: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Spaltzugfestigkeit des Prüflöses 4 (Bestandsbeton, BAB A11, UB mit Splitt, OB als WB)

Beim Prüflös 5 zeigen die h- und k-Werte Auffälligkeiten bei der Prüfstelle 10 (Abbildung 22). So weist diese Prüfstelle sowohl die größten Abwei-

chungen vom Mittelwert als auch die größte Prüfstreuung auf.

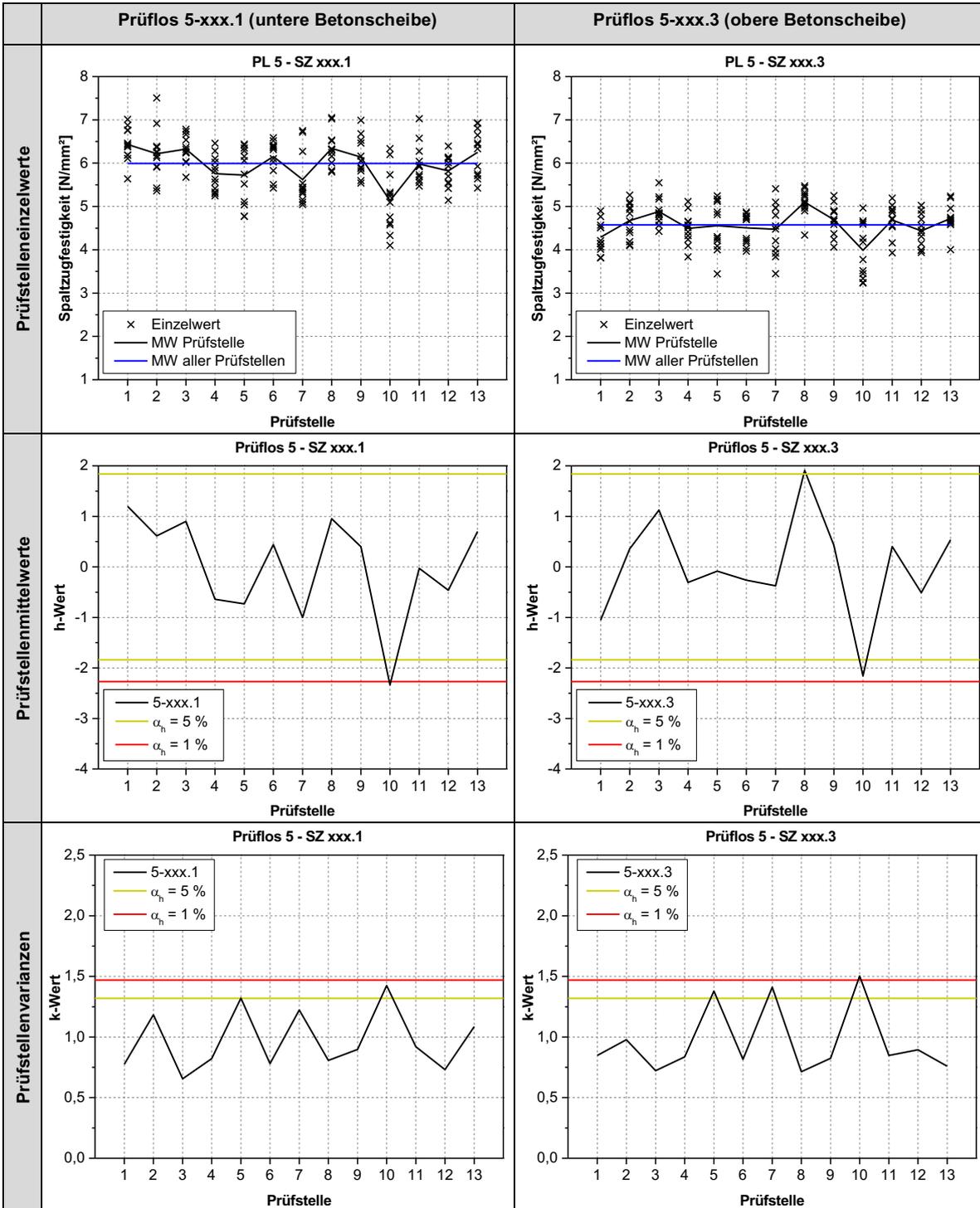


Abbildung 22: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Spaltzugfestigkeit des Prüflöses 5 (Bestandsbeton, BAB A2, UB mit Splitt, OB als WB)

Bei den Spaltzugfestigkeitsprüfungen an der unteren und oberen Betonscheibe des Prüfloses 6 wurde bei der Prüfstelle 12 eine signifikant erhöhte Prüfstreuung festgestellt (Abbildung 23, h-Werte).

Auch die Mittelwerte dieser Prüfstelle weichen am stärksten vom Gesamtmittelwert aller Prüfstellen ab. Die Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden.

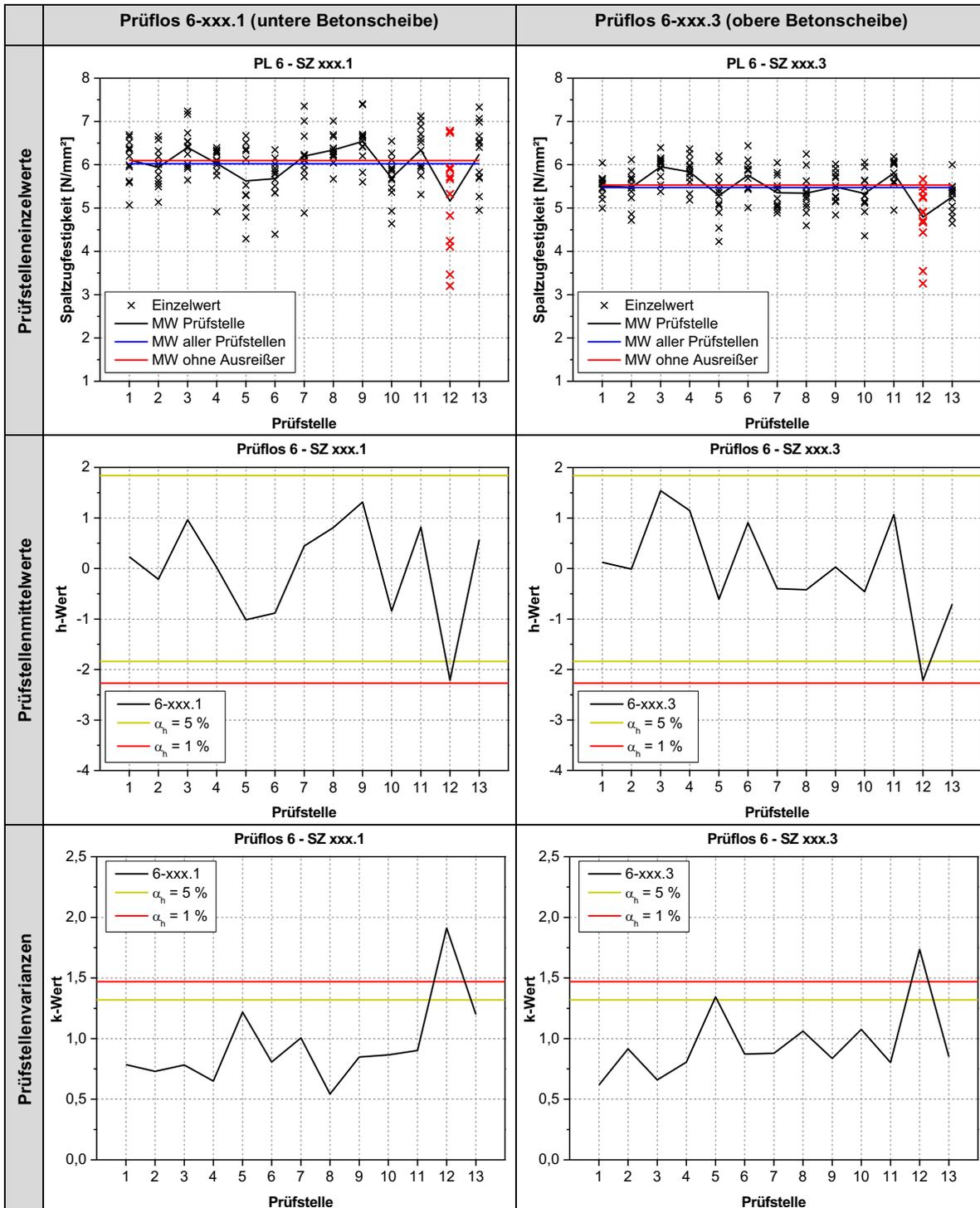


Abbildung 23: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Spaltzugfestigkeit des Prüfloses 6 (Bestandsbeton, BAB A14, UB mit Kies, OB als WB)

Beim Prüflös 7 weist lediglich die Prüfstelle 2 bei der unteren sowie die Prüfstelle 5 bei der oberen Betonscheibe signifikant erhöhte Prüfstreuungen

bei der Spaltzugfestigkeitsprüfung auf (Abbildung 24, k-Werte).

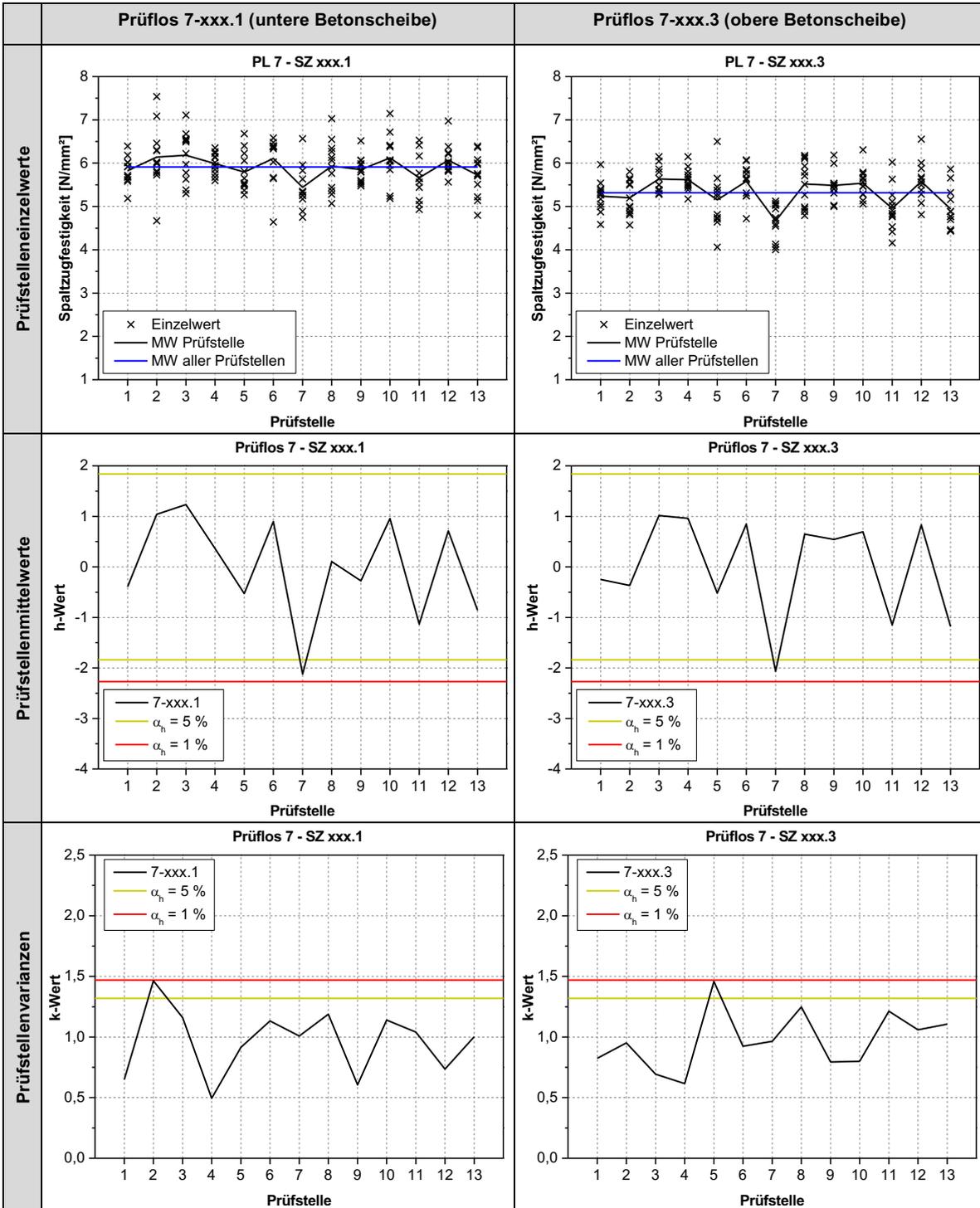


Abbildung 24: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Spaltzugfestigkeit des Prüflöses 7 (Bestandsbeton, BAB A38, UB mit Kies, OB als WB)

### 6.3.3 Druckfestigkeit

Adäquat zur Spaltzugfestigkeitsprüfung wurden auch die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung an dem aus der Mitte des jeweiligen Betonprüfkörpers gewonnenen Betonzylinders statistisch betrachtet. Die hierbei ermittelten prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Prüflose 1 bis 8 sind in Abbildung 25 bis Abbildung 28 dargestellt.

Die Abbildung 25 zeigt, dass keine der Prüfstellen bei der Druckfestigkeitsprüfung am Laborbeton bei der Erstprüfung im Transportbetonwerk signifikant erhöhte Mittelwerte und Prüfstreuungen aufweist (Prüflose 1 und 2).

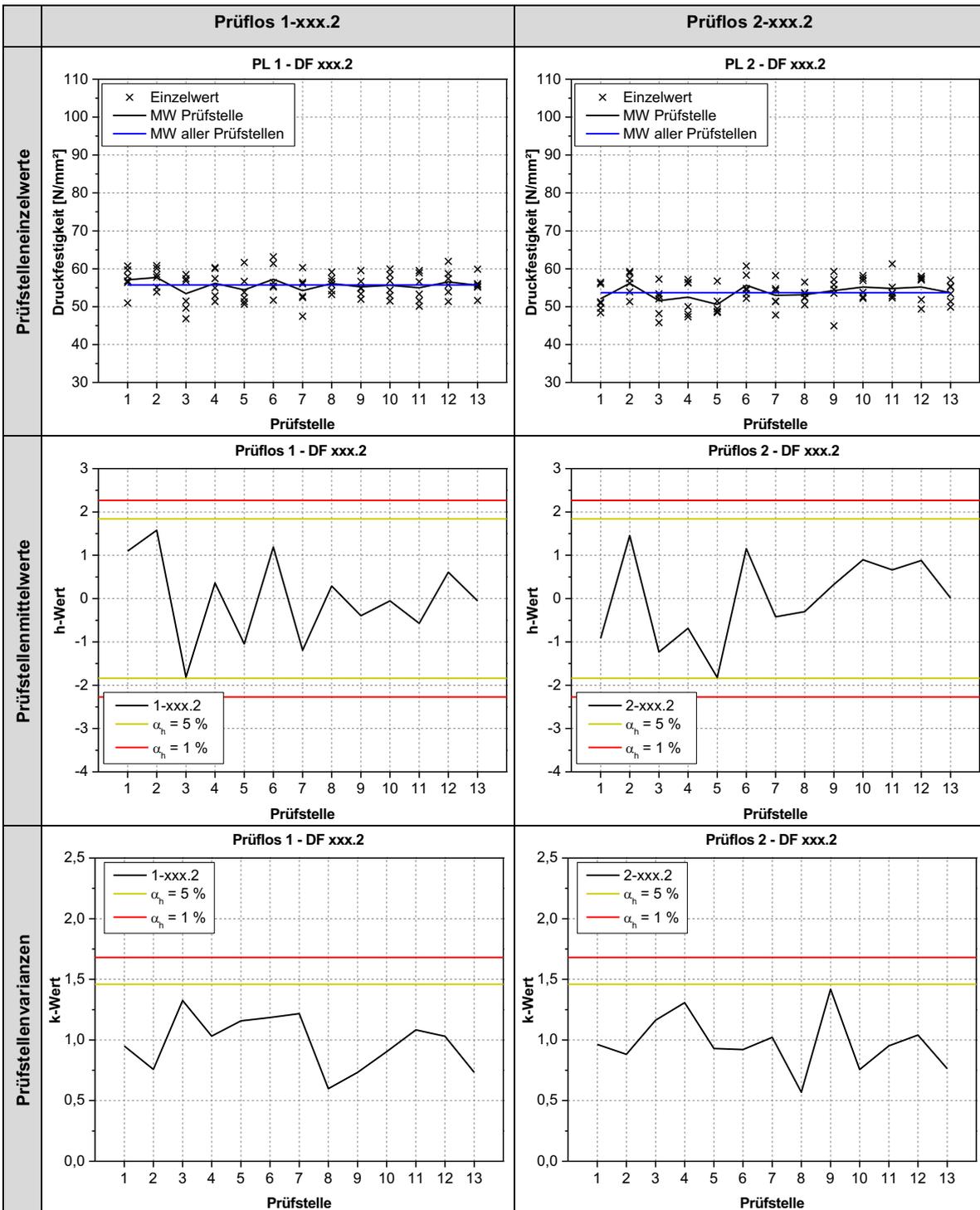


Abbildung 25: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Druckfestigkeit der Prüflose 1 und 2 (Laborbeton, Erst-/ Eignungsprüfung im Transportbetonwerk)

Das Gleiche gilt für die im Rahmen der Übereinstimmungskontrolle durchgeführte Bestimmung der Druckfestigkeit an aus der Versuchsplatte gewonnenen Bohrkernen des Laborbetons (Abbildung 26, Prüflös 3). Bemerkenswert ist beim Prüflös 8, dass die in Abbildung 26 dargestellten Einzelwerte im Vergleich zu den anderen Prüflösen sehr geringe

Prüfstreuungen aufweisen. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die gewollte Homogenisierung des Materials durch die Minimierung des Größtkorns zurückzuführen. In diesem Kontext relativiert sich die bei der Prüfstelle 5 als signifikant erhöhte bewertete Prüfstreuung.

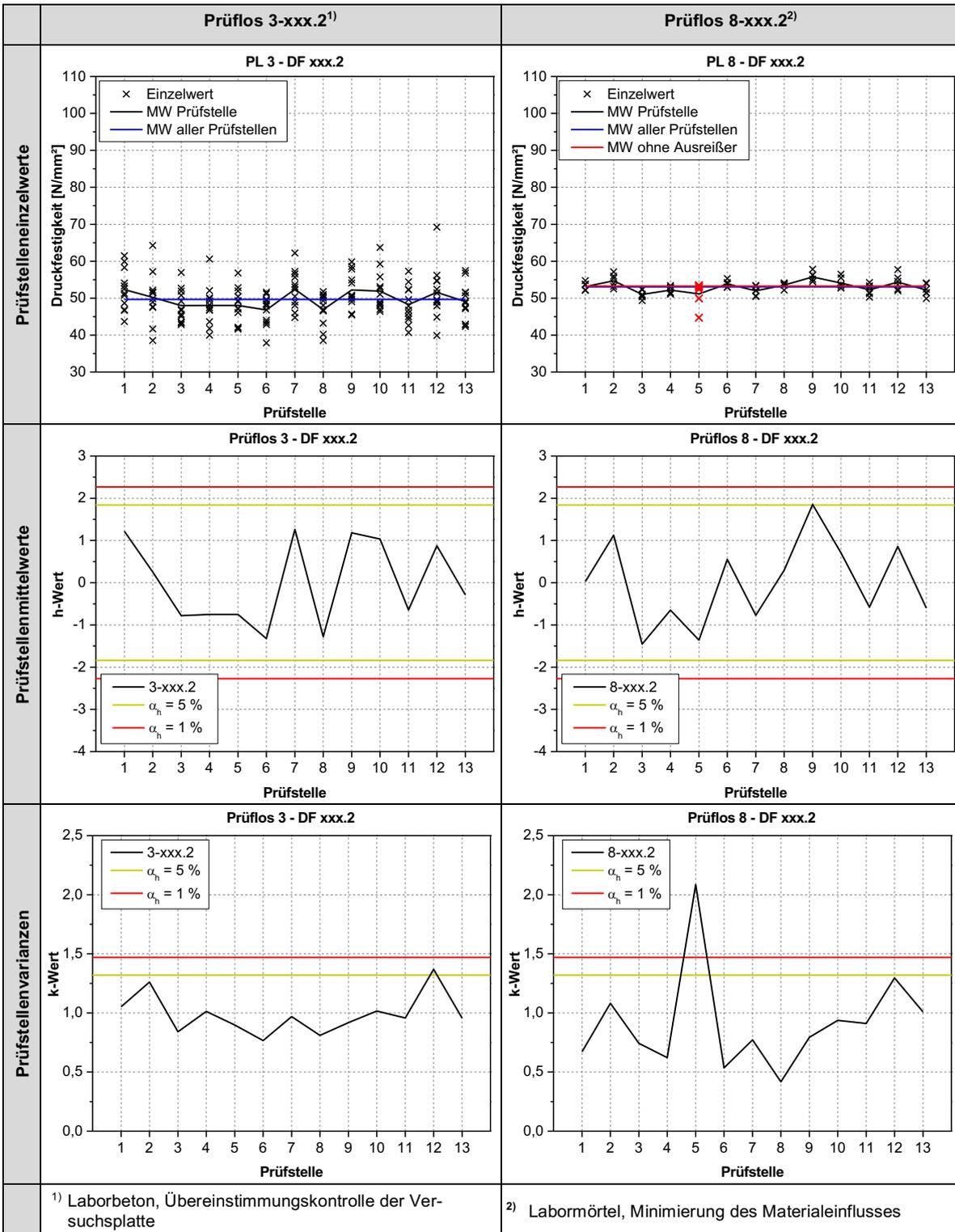


Abbildung 26: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Druckfestigkeit der Prüflöse 3 und 8

Auffallend ist bei den aufgetragenen Ergebnissen der Druckfestigkeit für den Bestandsbeton in der Abbildung 27 und Abbildung 28, dass tendenziell die Einzelwerte der jeweiligen Prüfstellen größeren Schwankungen unterliegen. Bei Prüflos 4 wurde die Prüfstelle 8 mit einer signifikanten Abweichung ihres Mittelwertes identifiziert (Abbildung 27, h-

Wert). Des Weiteren wurde beim Prüflos 6 bei der Prüfstelle 3 eine signifikant erhöhte Prüfstreuung festgestellt. Diese ist vor allem auf einen minimalen Einzelwert zurückzuführen. Ebenfalls, jedoch deutlich schwächer, ist dieser Umstand bei der Prüfstelle 2 des Prüfloses 7 ausgeprägt (Abbildung 28).

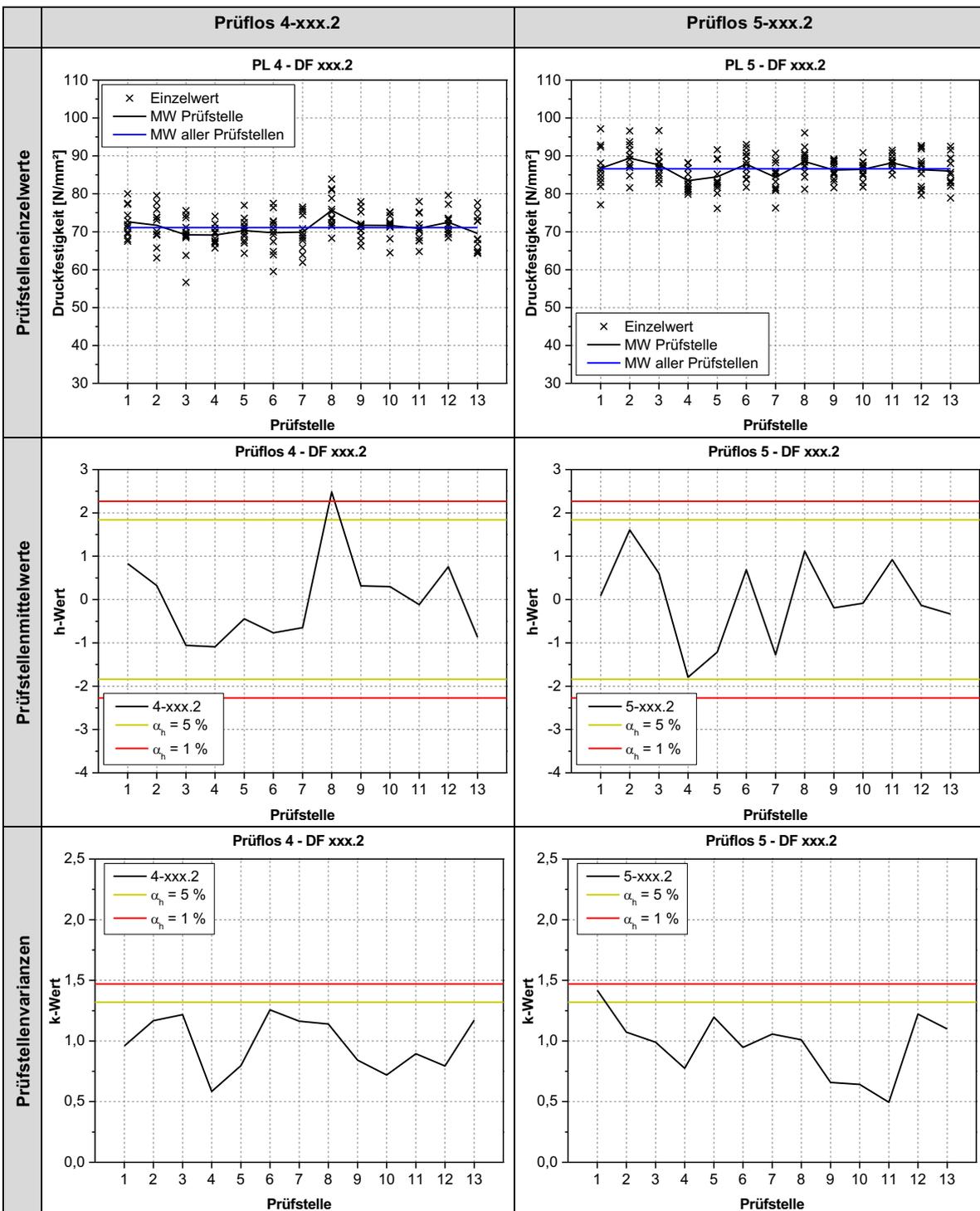


Abbildung 27: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Druckfestigkeit der Prüflose 4 (BAB A11) und 5 (BAB A2), (Bestandsbeton UB mit Splitt, OB als WB)

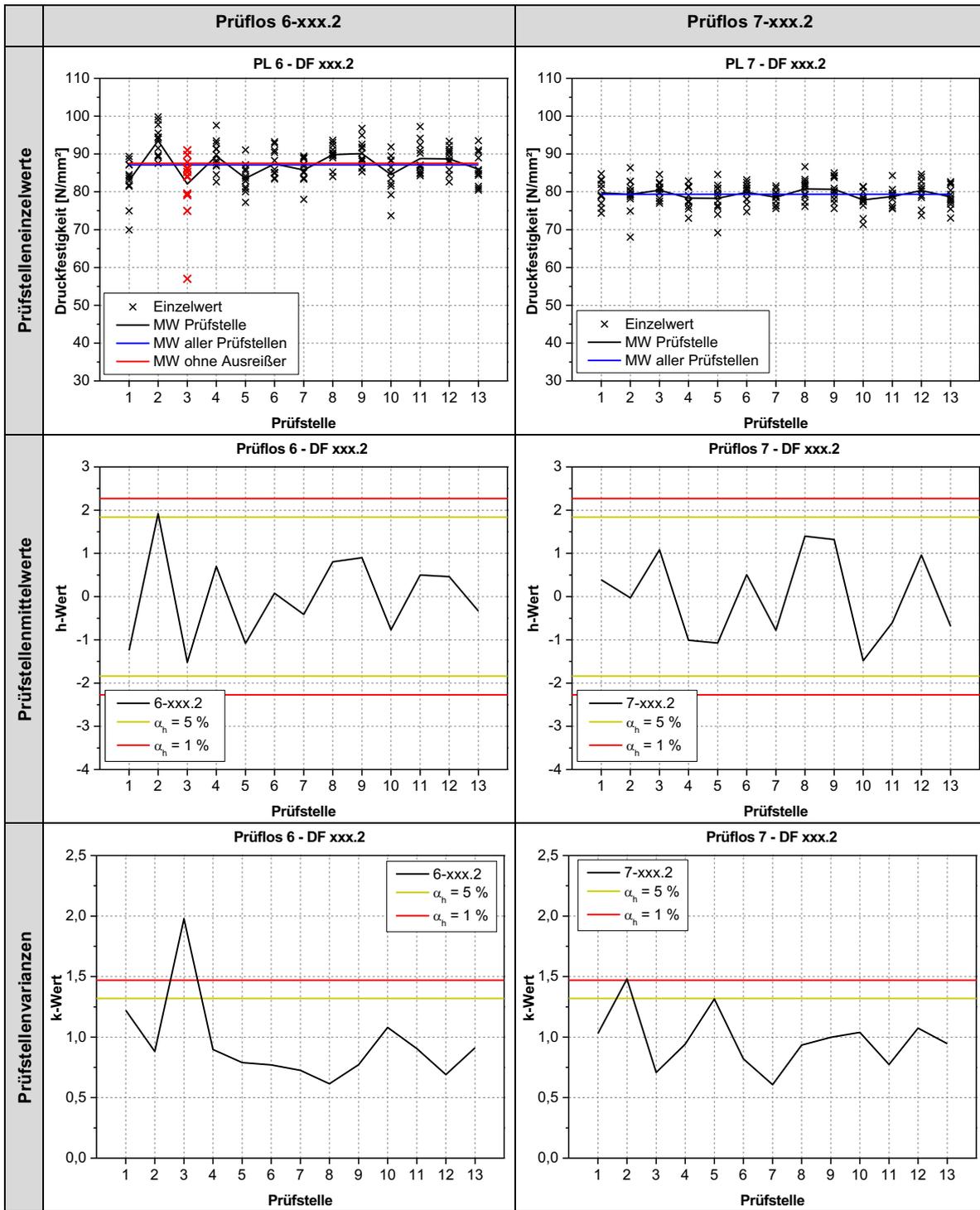


Abbildung 28: Darstellung der prüfstellenspezifischen Einzel-, h- und k-Werte der Druckfestigkeit der Prüflöse 6 (BAB A14) und 7 (BAB A38), (Bestandsbeton UB mit Kies, OB als WB)

Basierend auf der Betrachtung der Einzel-, h- und k-Werte der ermittelten Spaltzug- und Druckfestigkeiten stellt sich die Frage, ob die bei der Spaltzug- und Druckfestigkeitsprüfung der einzelnen Prüflöse identifizierten Auffälligkeiten (signifikante Abweichung des Mittelwertes bzw. stark erhöhter Prüfstreuung) als Ausreißer zu behandeln sind. Zu

diesem Zweck wurde der Grubbs- und Cochran-Test durchgeführt.

## 6.4 Identifikation von Ausreißern

Die hier verwendeten Ausreißertests basieren auf der Überprüfung der Homogenität (d.h. der Übereinstimmung bzw. Gleichheit) der Mittelwerte und Varianzen. Dabei wird mittels statistischer Testverfahren überprüft, ob sich die an den 13 Prüfstellen bestimmten Mittelwerte bzw. Varianzen des jeweiligen Prüfloses statistisch signifikant voneinander unterscheiden oder miteinander statistisch verträglich sind. So gilt es zu prüfen, ob die beobachteten Unterschiede in den Mittelwerten und Varianzen rein zufällig auftreten oder statistisch nachweisbar sind.

Zur Überprüfung der Homogenität der prüfstellen-spezifischen Mittelwerte wurde im vorliegenden Fall der Grubbs-Test verwendet. Die Varianzhomogenität wurde mit dem Cochran-Test geprüft. Beide statistische Tests setzen eine Normalverteilung der ermittelten Einzelwerte voraus. Die hierfür erforderliche Beweisführung ist dem Abschnitt 8 zu entnehmen.

### 6.4.1 Grundlagen

Beim Grubbs-Test wird zunächst die Prüfgröße  $H_{ij}$  ermittelt. Sie ergibt sich nach Gleichung (8) als Betrag der Differenz der Prüfstellenmittelwerte  $\bar{x}_{ij}$  vom Gesamtmittelwert  $\bar{x}_i$  aller Prüfstellen bezogen auf die Standardabweichung  $s_i$  der Mittelwerte aller Prüfstellen.

$$H_{ij} = \frac{|\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i|}{s_i} = |h_{ij}| \quad (8)$$

mit  $h_{ij}$  aus Gleichung (1).

Die so ermittelten Prüfgrößen  $H_{ij}$  werden anschließend mit dem zugehörigen Grenzwert  $H$  der Grubbs-Tabelle [GRAF 1998] verglichen. Der Tabellenwert selbst wird maßgebend von der Anzahl  $j$  der Prüfstellen und der Wahrscheinlichkeit  $P$  der Richtigkeit der Nullhypothese bestimmt. Für 13 Prüfstellen und eine Wahrscheinlichkeit von 99 % beträgt  $H = 2,61$ . Nimmt  $H_{ij}$  höhere Werte als  $H$  an, so besteht ein signifikanter Unterschied zwischen dem ausreißerverdächtigen Prüfstellenmittelwert  $\bar{x}_{ij}$  und dem Gesamtmittelwert  $\bar{x}_i$ . Dies wiederum ist ein Beleg für den Ausreißer.

Die Voraussetzung für die Anwendung des Cochran-Tests ist die Ermittlung der gleichen Anzahl an Einzelwerten durch jede Prüfstelle beim jeweiligen Prüflos. Dies ist im vorliegenden Fall gegeben. Als Prüfgrößen wird bei diesem Test  $K_{ij}$  ermittelt. Sie ergibt sich nach Gleichung (9) aus

dem Quotienten der ausreißerverdächtigen Varianz  $s_{ij}^2$  der jeweiligen Prüfstelle und der Summe der Varianzen aller Prüfstellen für das betrachtete Prüflos. Die Varianz selbst ergibt sich aus dem Quadrat der Standardabweichung  $s_{ij}$ .

$$K_{ij} = \frac{s_{ij}^2}{\sum_{j=1}^q s_{ij}^2} = \frac{k_{ij}^2}{q} \quad (9)$$

mit  $k_{ij}$  aus Gleichung (5).

Die ermittelten Prüfgröße  $K_{ij}$  werden anschließend dem Wert  $K$  aus der Cochran-Tabelle [GRAF 1998] gegenüber gestellt. Der Tabellenwert wird dabei maßgebend von der Wahrscheinlichkeit  $P$  der Richtigkeit der Nullhypothese, der Anzahl  $j$  der Prüfstellen und der Anzahl der Einzelwerte jeder Prüfstelle für das jeweilige Prüflos bestimmt. Im vorliegenden Fall ergibt sich mittels Interpolation ein Wert von  $K = 0,27$  bei den Prüflosen 1, 2 und 8 (6 Einzelwerte) sowie ein Wert von 0,208 bei allen anderen Prüflosen mit je 12 Einzelwerten. Nimmt  $K_{ij}$  höhere Werte als  $K$  an, so besteht ein signifikanter Unterschied zwischen der ausreißerverdächtigen Varianz der jeweiligen Prüfstelle  $s_{ij}^2$  und der mittleren Varianz aller Prüfstellen. Dies ist ein sicherer Indikator für das Vorhandensein eines Ausreißers.

### 6.4.2 Ergebnisse

Unter Verwendung des Grubbs- und Cochran-Tests wurden die in der Tabelle 14 und Tabelle 15 prüflossspezifisch aufgeführten Ausreißer bei der Spaltzug- und Druckfestigkeitsprüfung identifiziert. So stellen bei den Prüflosen 1 und 4 die Labormittelwerte der Spaltzugfestigkeit der Prüfstellen 2 und 11 Ausreißer dar. Zusätzlich wurden die Varianzen der Prüfstellen 10 bzw. 12 bei den Prüflosen 4 und 8 bzw. 6 als Ausreißer identifiziert. Im Gegensatz zur Spaltzugfestigkeitsprüfung wurden bei der Druckfestigkeitsprüfung bei keinem Prüflos Ausreißer bei den Labormittelwerten der jeweiligen Prüfstellen festgestellt. Lediglich bei den Prüflosen 6 und 8 treten bei den Varianzen der Prüfstellen 3 und 12 Ausreißer auf.

Basierend auf der Eliminierung der identifizierten Ausreißer wurden nachfolgend die statistischen Kennwerte prüflossspezifisch ermittelt.

**Tabelle 14:** Mittels Grubbs- und Cochran-Test identifizierte Ausreißer der Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfung (Streuung der Mittel- und Einzelwerte)

Prüflos	Prüfstelle	Identifikation von Ausreißern		Bemerkungen
		Grubbs-Test	Cochran-Test	
PL1-xxx.1	11	x	-	Fehlbedienung des Spaltzugrahmens
PL4-xxx.1	2	x	-	falsche Kalibrierdatei
PL4-xxx.3	2	x	-	falsche Kalibrierdatei
PL6-xxx.1	12	-	x	-
PL6-xxx.3	12	-	x	-
PL8-xxx.1	10	-	x	-

**Tabelle 15:** Mittels Grubbs- und Cochran-Test identifizierte Ausreißer der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung (Streuung der Mittel- und Einzelwerte)

Prüflos	Prüfstelle	Identifikation von Ausreißern		Bemerkungen
		Grubbs-Test	Cochran-Test	
PL6-xxx.2	3	-	x	-
PL8-xxx.2	5	-	x	-

## 6.5 Statistische Kennwerte

### 6.5.1 Grundlagen

Zur Beurteilung der Präzision des Prüfverfahrens ist die Kenntnis der Standardabweichung und der Variationskoeffizienten unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen notwendig. Unter Präzision wird dabei in Anlehnung an [DIN ISO 5725-1] das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung zwischen den unabhängig ermittelten Einzelwerten mit ein und demselben Prüfverfahren unter festgelegten Bedingungen verstanden. Dabei beinhalten die Wiederholbedingungen die Gewinnung voneinander unabhängiger Einzelwerte mit dem Prüfverfahren an einem Prüflos durch eine Prüfstelle mit dem gleichen Personal und derselben Prüfvorrichtung.

Demgegenüber sind die Vergleichbedingungen so definiert, dass hier die Einzelwerte mit einem Prüfverfahren an einem Prüflos durch mehrere Prüfstellen mit unterschiedlichem Personal und verschiedenartiger Prüftechnik bestimmt werden. Als Präzisionsmaß dient dabei die Standardabweichung. Die Definitionen der Wiederhol-, Vergleich- und Prüfstellenvarianz  $s_r^2$ ,  $s_R^2$  und  $s_L^2$  sind den Gleichungen (10) bis (12) zu entnehmen.

Die in Klammern gesetzte Differenz in Gleichung (10) berechnet dabei die Abweichung der Summe aller  $n$  quadrierten Messwerte innerhalb einer Prüfstelle vom  $n$ -fachen Wert des quadrierten Prüfstellenmittelwertes. Diese Differenz ist nichtnegativ und umso größer je breiter die Messwerte innerhalb einer Prüfstelle gestreut sind. Die Wiederholvarianz  $s_r^2$  setzt sich dann als Summe aller dieser  $q$  Differenzen, normiert hinsichtlich der Anzahl der Messwerte  $n$  je Prüfstelle und der Anzahl der Prüfstellen, zusammen, ist ebenfalls nichtne-

gativ und umso größer je breiter die Streuungen der Messwerte innerhalb der Prüfstellen sind. Insofern spiegelt  $s_r^2$  in kumulierter Form die Varianz innerhalb aller Prüfstellen wieder.

$$s_r^2 = \frac{\sum_{j=1}^q \left( \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 - n \cdot \bar{x}_{ij}^2 \right)}{(n-1) \cdot q} \quad (10)$$

Die Prüfstellenvarianz  $s_L^2$  in Gleichung (12) wird im Wesentlichen vom 1. Summanden bestimmt. Dieser beschreibt die Abweichung der Summe aller  $q$  quadrierten Prüfstellenmittelwerte vom  $q$ -fachen Wert des quadrierten Gesamtmittelwertes. Obwohl diese Differenz immer nichtnegativ ist, kann in Einzelfällen bei genügend großer Wiederholvarianz  $s_r^2$  die Prüfstellenvarianz negativ sein und wird dann Null gesetzt. Dies ergibt sich bei allen Ergebnissen nur einmal, nämlich im Fall der Druckfestigkeit beim Prüflos 1. An der Prüfstellenvarianz wird also das Maß der Streuung der Prüfstellenmittelwerte deutlich.

$$s_L^2 = s_R^2 + s_r^2 \quad (11)$$

Die Vergleichvarianz  $s_R^2$  setzt sich nach Gleichung (12) somit aus der Prüfstellenvarianz  $s_L^2$  und der Wiederholvarianz  $s_r^2$  zusammen und es gilt immer  $s_R^2 \geq s_r^2$ .

$$s_R^2 = \frac{q \cdot \sum_{j=1}^q \bar{x}_{ij}^2 - q \cdot \bar{x}_i^2}{q-1} + \frac{n-1}{n} \cdot s_r^2 \quad (12)$$

Bezieht man die aus der Varianz abgeleitete Standardabweichung auf den Mittelwert, so erhält man den jeweiligen Variationskoeffizienten  $v_r$ ,  $v_R$ , und  $v_L$  entsprechend der Gleichungen (13) bis (15).

$$v_r = \frac{S_r}{\bar{x}_i} \quad (13)$$

$$v_R = \frac{S_R}{\bar{x}_i} \quad (14)$$

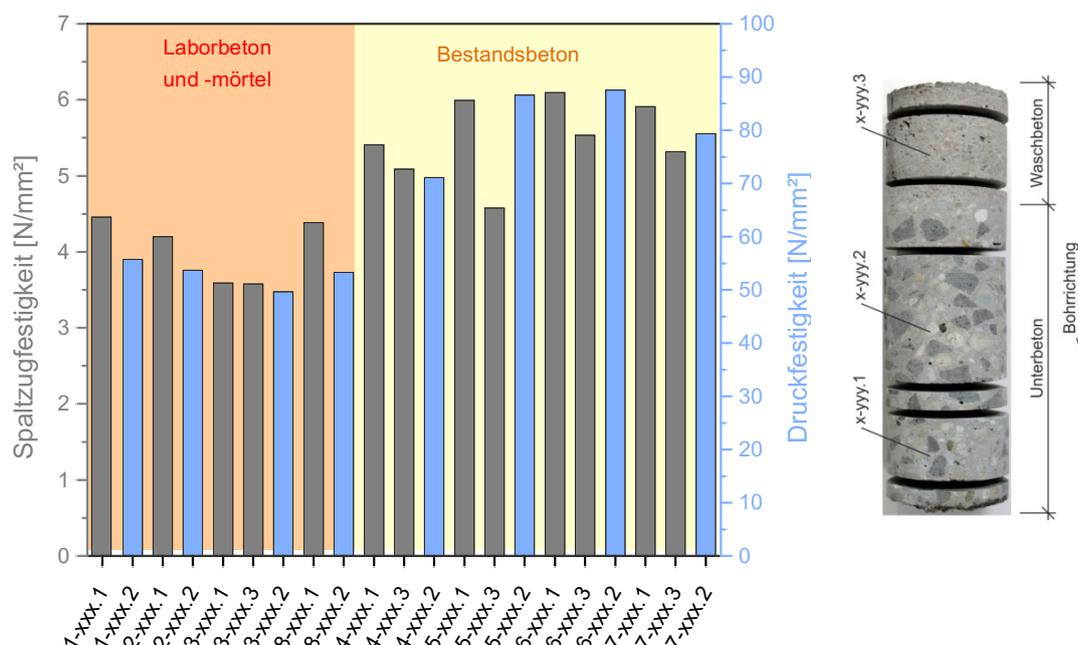
$$v_L = \frac{S_L}{\bar{x}_i} \quad (15)$$

### 6.5.2 Ergebnisse

Die Abbildung 29 gibt einen Überblick über die prüflossspezifischen **Gesamtmittelwerte der Spaltzug- und Druckfestigkeit** aller Prüfstellen mit Eliminierung der Ausreißer. Generell ist erkennbar, dass der Laborbeton und -mörtel deutlich geringere Festigkeitswerte aufweisen als die Be-

standsbetone. Bei den Bestandsbetonen besitzt die untere Betonscheibe (Unterbeton) generell eine höhere Spaltzugfestigkeit als die ober Betonscheibe (Waschbeton). Ein systematischer Einfluss der Art der Körnung (Splitt Prüflöse 4 und 5 bzw. Rundkorn bei den Prüflösen 6 und 7) auf die Festigkeitskennwerte des Unterbetons ist nicht erkennbar.

Bei den Laborbetonen ist auffällig, dass die Festigkeitskennwerte an den Teilproben aus dem im Transportbetonwerk hergestellten Zylindern (Prüflöse 1 und 2) höhere Werte aufweisen als die der Versuchsplatte entnommenen Bohrkerne (Prüflöse 3). Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist dies primär auf die ungleichmäßige Verdichtung der Versuchsplatte zurückzuführen (siehe auch Kapitel 5.2.1).



**Abbildung 29:** Gesamtmittelwerte der ermittelten Spaltzug- und Druckfestigkeiten der einzelnen Prüflöse ohne Ausreißer

Die prüflossspezifische **Standardabweichung der Spaltzugfestigkeit** unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen zeigt die Abbildung 30. Erwartungsgemäß nimmt die Standardabweichung unter Wiederholbedingungen, d.h. innerhalb der Prüfstellen, generell kleinere Werte an als unter Vergleichbedingungen. Letzteres resultiert aus der zusätzlichen Erfassung der Streuung zwischen den Prüfstellen. Auffallend ist generell, dass die Standardabweichung des Laborbetons und -mörtels deutlich geringer ist als bei den Bestandsbetonen. Im Fall der Bestandsbetone ist die Spaltzugfestigkeit der Waschbetone in der Regel deutlich kleiner als bei den Unterbetonen. Durch die Homogenisie-

rung des Materials über die Minimierung des Größtkorns der Gesteinskörnung bei dem Labormörtel (Prüflöse 8) werden hier die geringsten Standardabweichungen mit 0,197 bzw. 0,231 N/mm<sup>2</sup> unter Wiederhol- bzw. Vergleichbedingungen ermittelt.

Aufschlussreich ist eine vergleichende Betrachtung der Abbildung 30 und Abbildung 31. Letztere zeigt die prüflossspezifische Darstellung der **Variationskoeffizienten der Spaltzugfestigkeit** und somit die auf den Gesamtmittelwert der prüflossspezifischen Spaltzugfestigkeit bezogene Standardabweichung unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen. Es wird deutlich, dass aus statistischer

Sicht die Bestandsbetone aufgrund ihrer höheren Spaltzugfestigkeit gegenüber dem Laborbeton eine Aufwertung erfahren. So nimmt der Variationskoeffizient der Bestandsbetone unter Wiederholbedingungen Werte von 0,071 bis 0,092 bzw. unter Vergleichbedingungen Werte zwischen 0,081 bis

0,106 an. Demgegenüber liegt der entsprechende Variationskoeffizient des Laborbetons der im Transportbetonwerk hergestellten Zylinder (Prüflosse 1 und 2) im ungünstigsten Fall bei 0,065 mit einem nahezu vernachlässigbaren Unterschied zwischen Wiederhol- und Vergleichbedingungen.

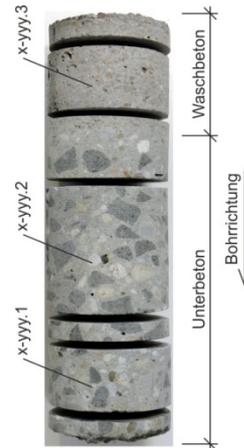
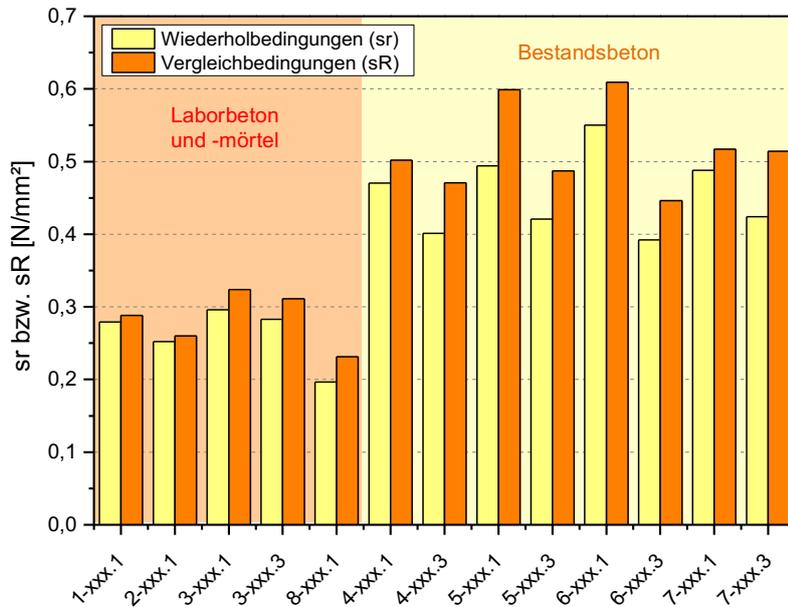


Abbildung 30: Standardabweichungen der Spaltzugfestigkeit unter Wiederholbedingungen (s<sub>r</sub>) und Vergleichbedingungen (s<sub>R</sub>)

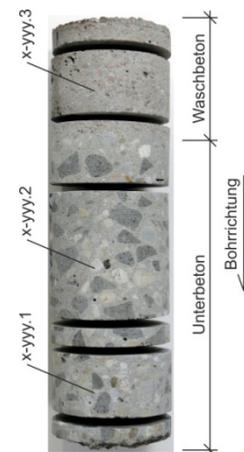
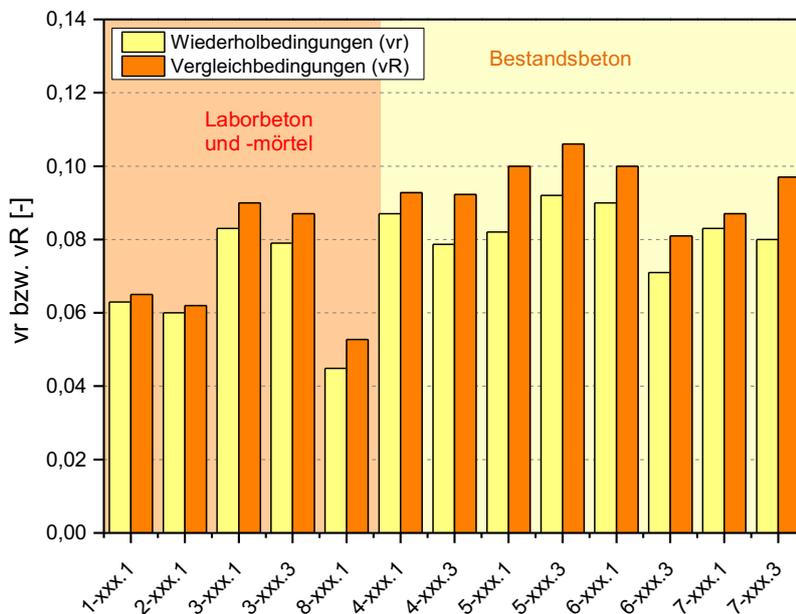


Abbildung 31: Variationskoeffizienten der Spaltzugfestigkeit unter Wiederholbedingungen (v<sub>r</sub>) und Vergleichbedingungen (v<sub>R</sub>)

Bemerkenswert ist allerdings, dass der Variationskoeffizient des Laborbetons eine starke Verschlechterung bei der Versuchsplatte (Prüflos 3) erfährt. So erreicht dieser hier quasi unabhängig

von der Lage der Betonscheibe einen maximalen Wert von 0,083 unter Wiederholbedingungen und 0,090 unter Vergleichbedingungen und schließt damit nahezu zu den Bestandsbetonen auf. Die

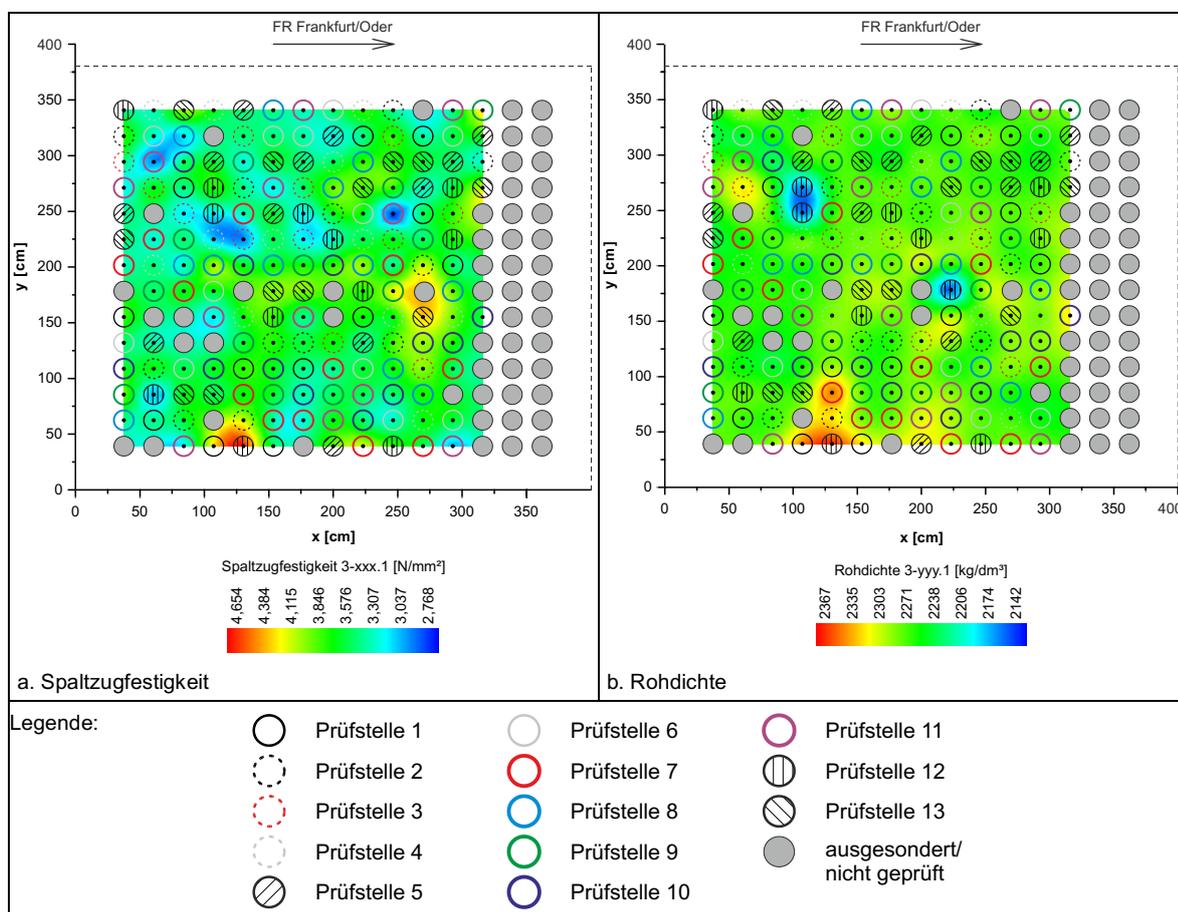
Ursache hierfür ist wiederum in der Herstellungstechnologie der Versuchsplatte begründet. So ist die Verdichtung der Versuchsplatte mit den vier am Böschungslöffel montierten Rüttelflaschen lokal sehr ungleichmäßig ausgeprägt. Das wiederum hat starke Schwankungen im Porengefüge und damit in der Spaltzugfestigkeit des Laborbetons zur Folge. Einen visuellen Eindruck der lokalen Verteilung der Spaltzugfestigkeiten über die Oberfläche der Versuchsplatte vermitteln Abbildung 32a und Abbildung 33a.

In Abbildung 32a und Abbildung 33a sind die Spaltzugfestigkeiten der oberen und unteren Betonscheibe farbcodiert aufgetragen. Zusätzlich ist die lokale Einordnung der Bohrkern zur jeweiligen

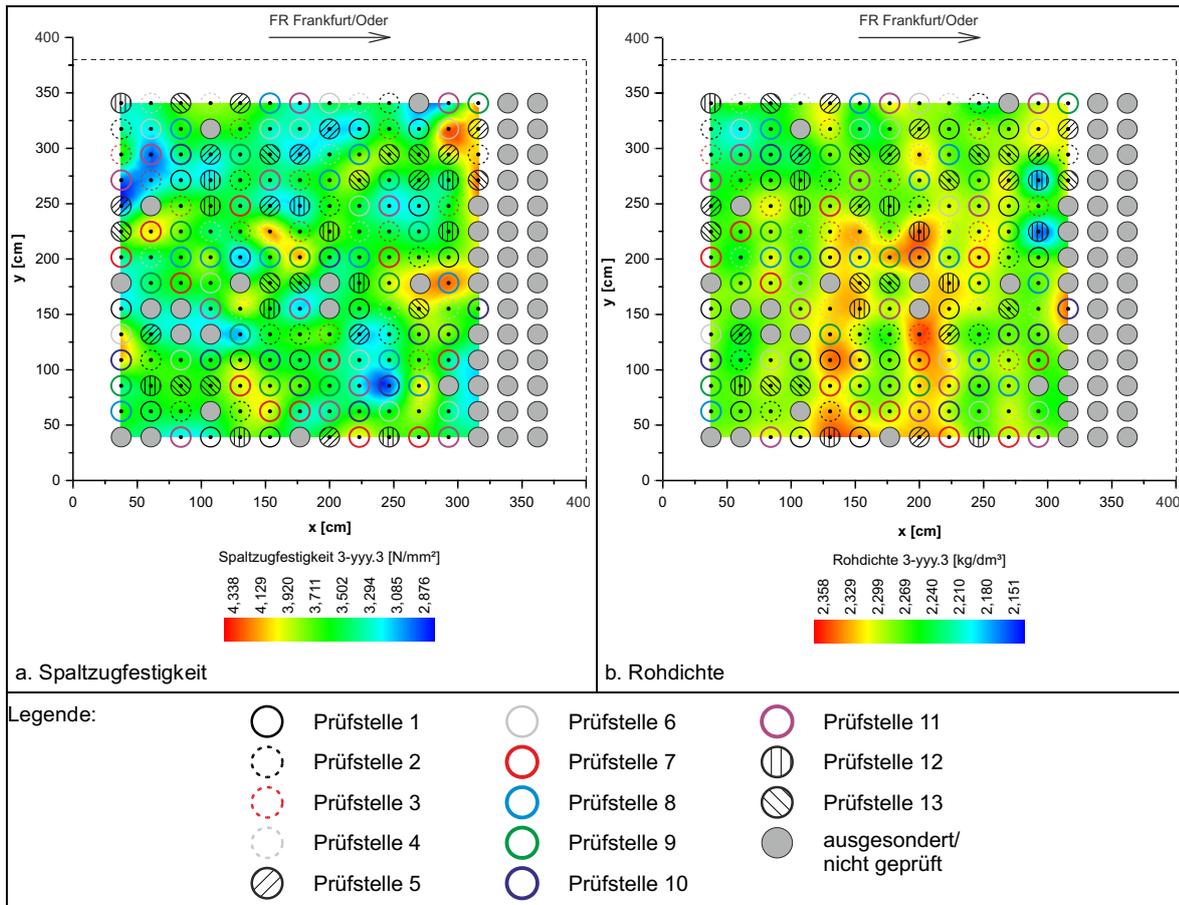
Prüfstelle ersichtlich. Unverkennbar sind dabei die lokal stark ausgeprägten Schwankungen der Spaltzugfestigkeiten zwischen 2,67 und 4,75 N/mm<sup>2</sup> bei der unteren bzw. 2,81 bis 4,41 N/mm<sup>2</sup> bei der oberen Betonscheibe.

Eine vergleichende Betrachtung der Verteilungsbilder der Spaltzugfestigkeit und Rohdichte in Abbildung 32 und Abbildung 33 verdeutlicht, dass zwischen beiden Prüfgrößen keine Korrelation vorliegt. Dies bestätigen auch zusätzlich durchgeführte Korrelationsuntersuchungen.

Der geringste Variationskoeffizient mit 0,045 unter Wiederholbedingungen bzw. 0,053 unter Vergleichsbedingungen wurde erwartungsgemäß beim Labormörtel (Prüflos 8) bestimmt.



**Abbildung 32:** Verteilungsbilder der Spaltzugfestigkeit und Rohdichte der unteren Scheiben der aus der Versuchsplatte entnommenen Bohrkern (Prüflos 3-xxx.1)



**Abbildung 33:** Verteilungsbilder der Spaltzugfestigkeit und Rohdichte der oberen Scheiben der aus der Versuchsplatte entnommenen Bohrkern (Prüflos 3-xxx.3)

Adäquat zur Spaltzugfestigkeit wurde auch die **Standardabweichung der Druckfestigkeit** unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen in Abbildung 34 aufgetragen. Die größte Standardabweichung wurde dabei an den Bohrkernabschnitten der Versuchsplatte bestimmt. Das lokale Verteilungsbild der an Bohrkernabschnitten der Versuchsplatte (Prüflos 3-xxx.2) ermittelten Druckfestigkeit zeigt die Abbildung 36a. Interessant ist dabei, dass die Rohdichteverteilung (Abbildung 36b) mit den ermittelten Druckfestigkeiten korreliert. Dies wurde auch durch weitergehende Korrelationsuntersuchungen bestätigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die großen lokalen Materialschwankungen auf die ungleichmäßige Verdichtung des Laborbetons zurückzuführen sind.

Die Standardabweichung der Druckfestigkeiten der im Transportbetonwerk hergestellten Zylinder des Laborbetons (Prüflose 1 und 2) sind erwartungsgemäß unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen deutlich kleiner. Die geringste Standardabweichung unter den gegebenen Bedingungen weist erneut der Labormörtel des Prüfloses 8 aufgrund der Materialhomogenisierung durch die Reduzierung des Größtkorns auf. Bemerkenswert ist aber

auch, dass die Standardabweichung der Druckfestigkeit unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen bei den Bestandsbetonen deutlich kleinere Werte annimmt als beim Laborbeton der Versuchsplatte.

Betrachtet man nun abschließend die Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen in Abbildung 35 so fällt auf, dass die Laborbetone aufgrund der geringeren prüflosspezifischen Mittelwerte der Druckfestigkeit im Vergleich zu den Bestandsbetonen eine schlechtere statistische Bewertung erfahren. So beträgt der maximale Variationskoeffizient bei den Prüflosen 1 und 2 unter Wiederholbedingungen 0,065 sowie unter Vergleichbedingungen 0,067. Aufgrund der bereits vorstehend ausführlich diskutierten Verdichtungsprobleme der Versuchsplatte (Prüflos 3) erhöht sich hier der Variationskoeffizient der Druckfestigkeit des Laborbetons auf 0,105 unter Wiederhol- bzw. auf 0,11 unter Vergleichbedingungen. Bei den Bestandsbetonen hingegen beschränkt sich der Variationskoeffizient unter den vorstehenden Extremalbedingungen auf maximal 0,058 bzw. 0,061. Den mit Abstand geringsten Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit

besitzt erwartungsgemäß der Labormörtel (Prüflos 8) mit 0,026 bzw. 0,035.

Einen zusammenfassenden Überblick über alle prüflosspezifisch ermittelten statistischen Kennwerte gibt Tabelle 16.

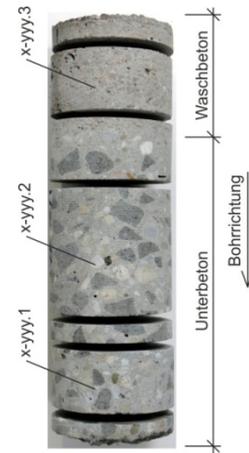
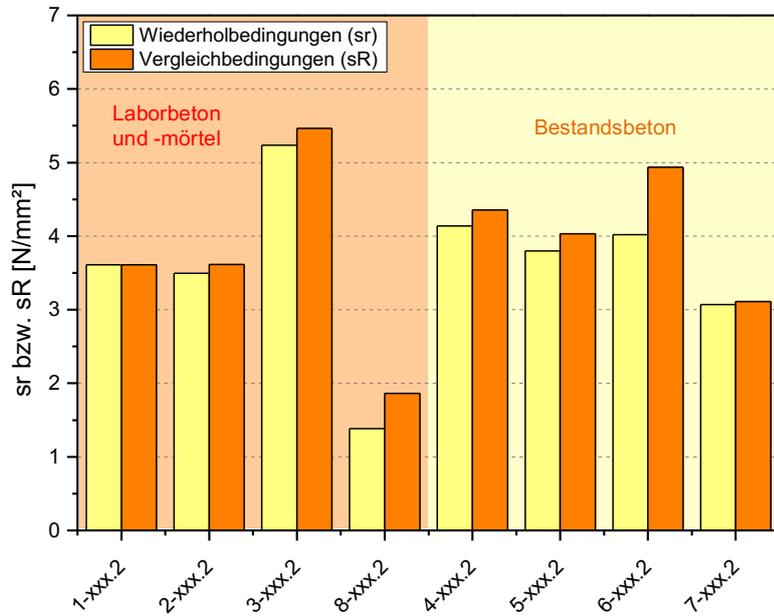


Abbildung 34: Standardabweichungen der Druckfestigkeit unter Wiederholbedingungen ( $s_r$ ) und Vergleichbedingungen ( $s_R$ )

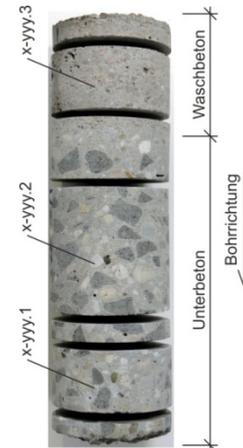
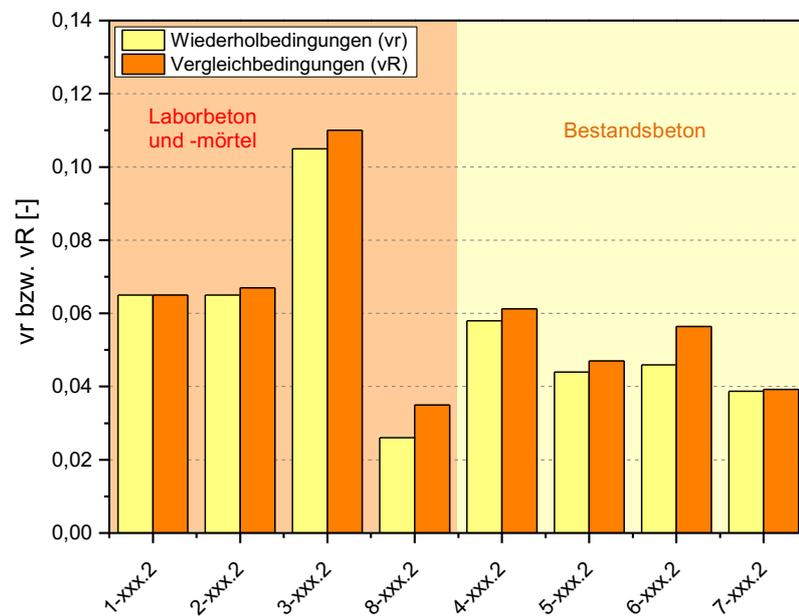
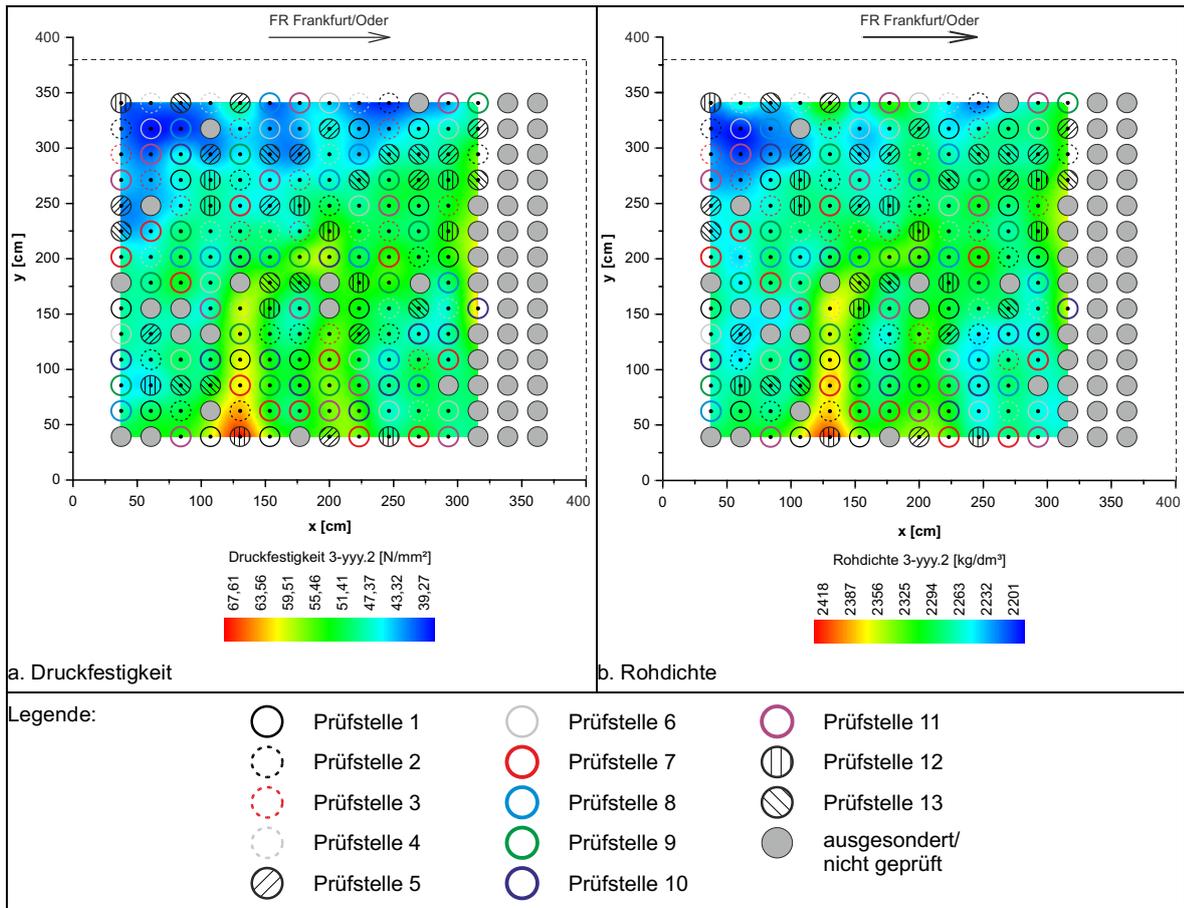


Abbildung 35: Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit unter Wiederholbedingungen ( $v_r$ ) und Vergleichbedingungen ( $v_R$ )



**Abbildung 36:** Verteilungsbilder der Druckfestigkeit sowie Rohdichte der Bohrkernabschnitte der aus der Versuchsplatte entnommenen Bohrkern (Prüflos 3-xxx.2)

**Tabelle 16:** Zusammenfassung aller mit dem klassischen Auswerteverfahren ermittelten statistischen Kennwerte der Prüflose

Prüf- los	Prüf- serie	berei- nigte Anzahl der Prüf- stellen	Gesamt- mittel- wert  $\bar{x}_j$  [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung		Variationskoeffizient		Varianz		
				Wiederhol- bedingungen	Vergleich- bedingungen	Wiederhol- bedingungen	Vergleich- bedingungen	Wiederhol- bedingungen	Vergleich- bedingungen	zwischen Prüfstellen
				$s_r$	$s_R$	$v_r$	$v_R$	$s_r^2$	$s_R^2$	$s_L^2$
				[N/mm <sup>2</sup> ]		[-]		[(N/mm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> ]		
1	1-xxx.1	12	4,46	0,279	0,288	0,063	0,065	0,078	0,083	0,005
	1-xxx.2	13	55,7	3,61	3,61	0,065	0,065	13,06	13,06	0,000
2	2-xxx.1	13	4,20	0,252	0,260	0,060	0,062	0,064	0,068	0,004
	2-xxx.2	13	53,7	3,50	3,61	0,065	0,067	12,21	13,06	0,844
3	3-xxx.1	13	3,59	0,296	0,324	0,083	0,090	0,088	0,105	0,017
	3-xxx.3	13	3,58	0,283	0,311	0,079	0,087	0,080	0,097	0,016
	3-xxx.2	13	49,7	5,24	5,46	0,105	0,110	27,409	29,841	2,432
8	8-xxx.1	12	4,38	0,197	0,231	0,045	0,053	0,039	0,053	0,015
	8-xxx.2	12	53,3	1,385	1,861	0,026	0,035	1,92	3,46	1,545
4	4-xxx.1	12	5,41	0,470	0,502	0,087	0,093	0,221	0,161	0,030
	4-xxx.3	12	5,10	0,425	0,488	0,083	0,096	0,252	0,221	0,060
	4-xxx.2	13	71,1	4,14	4,36	0,058	0,061	17,112	18,977	1,865
5	5-xxx.1	13	5,99	0,494	0,599	0,082	0,100	0,244	0,359	0,115
	5-xxx.3	13	4,58	0,421	0,487	0,092	0,106	0,178	0,237	0,060
	5-xxx.2	13	86,6	3,80	4,03	0,044	0,047	14,436	16,263	1,827
6	6-xxx.1	12	6,10	0,550	0,609	0,090	0,100	0,302	0,370	0,068
	6-xxx.3	12	5,53	0,392	0,446	0,071	0,081	0,154	0,199	0,045
	6-xxx.2	12	87,6	4,02	4,94	0,046	0,056	16,150	24,382	8,232
7	7-xxx.1	13	5,91	0,488	0,517	0,083	0,087	0,238	0,267	0,029
	7-xxx.3	13	5,32	0,424	0,514	0,080	0,097	0,179	0,264	0,084
	7-xxx.2	13	79,4	3,07	3,11	0,039	0,039	9,42	9,66	0,240

## 7 Statistische Auswertung der Prüfergebnisse nach robustem Verfahren

Vergleichend zur Auswertung der Daten nach klassischem Verfahren wurde versucht diese auch mit dem robusten Verfahren, das im Entwurf des Teil 4 des FGSV-Merkblattes [FGSV 2011] näher beschrieben ist, zu beurteilen. Dabei wurde jedoch festgestellt, dass das beschriebene robuste Verfahren so nicht anwendbar war und zahlreicher Korrekturen bedurfte. Letztere erfolgten basierend auf einem unveröffentlichten Aufsatz von Wilrich [WILRICH 2012].

Nach ISO 5725-2 sind bei klassischer Auswertung die in einem Ringversuch gewonnenen Ermittlungsergebnisse auf Ausreißer hinsichtlich des Mittelwertes und der Varianz zu testen. Ermittlungsergebnisse, die in mindestens einem dieser Tests einen Wert der Prüfgröße verursachen, die auf dem Signifikanzniveau von 1 % den kritischen Wert der Tests überschreiten, sind zu eliminieren.

Die Entscheidung zur Elimination eines Wertes kann allerdings problembehaftet sein, wenn es gute verfahrenstechnische Gründe gibt, diesen Wert beizubehalten oder wenn es einen oder mehrere

weitere Fastausreißer gibt. Die Entscheidung der Elimination von Werten wird im Regelfall einen wesentlichen Einfluss auf die errechneten Werte für die Wiederhol-, Prüfstellen- und Vergleichsvarianz haben.

Robuste Verfahren machen es möglich die Ermittlungsergebnisse in einer Weise auszuwerten, so dass es nicht erforderlich ist, Entscheidungen zu treffen, die sich auf die Ergebnisse substanziell auswirken. Deshalb können, wenn Grund zur Erwartung besteht, dass die Ergebnisse eines Ringversuchs Ausreißer enthalten werden, robuste Verfahren eine Alternative darstellen. So orientiert sich das robuste Schätzverfahren an der Masse der homogenen Daten und beinhaltet in der Regel eine Ausreißeranalyse, die sich am empirischen Median orientiert aber letztendlich nicht zur Eliminierung von Werten führt. Der Median selbst bedingt eine geringere Gewichtung von Ausreißern.

Die Entwicklung robuster Schätzer zur Effizienzsteigerung von Schätzverfahren ist seit den 1980er Jahren eine wichtige Forschungsrichtung in der mathematischen Statistik.

Eine weitergehende vergleichende Betrachtung ausgewählter Beurteilungskriterien des angewandten klassischen und des hier benutzten robusten Auswerteverfahrens enthält Tabelle 17

**Tabelle 17:** Vergleich der statistischer Auswerteverfahren

Beurteilungskriterium	Klassisches Verfahren	Robustes Verfahren
numerische Aufarbeitung des Datenmaterials	Berechnung von Kenngrößen (z.B. Zentralwerte, Varianzen etc.)	
graphische Aufarbeitung des Datenmaterials	bildliche Darstellung der h- und k- Werte	
Test auf Homogenität der Zentralwerte	<b>Grubbs-Test</b> - Zentralwert: Mittelwert - Konsequenz: Eliminierung von Ausreißerwerten	<b>Davies / Gather-Test</b> - Zentralwert: Median - Konsequenz: keine
Test auf Homogenität der Varianzen	<b>Cochran-Test</b> - Zentralwert: Mittelwert - Konsequenz: Eliminierung von Ausreißerwerten	<b>Brown / Forsythe-Test</b> - Zentralwert: Median - Konsequenz: keine
Berechnung von $s_r$ , $s_L$ , $s_R$ als Schätzer für die Wiederhol-, Prüfstellen- und Vergleichsstandardabweichung	mittels erneut berechneter Mittelwerte aus ggf. reduziertem Datenmaterial	nach Croux und Rousseeuw mittels der 25 %-Quantile der geordneten Absolutdifferenzen der Differenzen zwischen den Einzelwerten und dem Mittelwert je Prüfstelle den Prüfstellenmittelwerten und dem Gesamtmittelwert

### 7.1 Vorgehensweise

Im hier vorliegenden Fall fand zur Schätzung der Wiederhol-, Prüfstellen- und Vergleichsvarianz das robuste Verfahren nach [WILRICH 2012] Einsatz.

Der angewandte Rechenalgorithmus ist der Tabelle 18 zu entnehmen.

**Tabelle 18:** Rechenalgorithmus des robusten Auswerteverfahrens

A	Eingabe und Voraussetzungen
gegeben: Messergebnisse $x_{ijl}$ aus normalverteilter Grundgesamtheit mit	
$i = 1, \dots, p; j = 1, \dots, q; l = 1, \dots, n; B = q \cdot n; M > 2$	
$p$ : Anzahl der Prüflöse	
$q$ : Anzahl der Prüfstelle	
$n$ : konst. Anzahl von Ergebnissen für alle Prüfstellen	
$B$ : Anzahl der Messergebnisse $x_{ijl}$ je Prüflös	
B	Berechnung der robusten Schätzung $s_r^2$ für die Wiederholvarianz
1	Berechnung der Labormittelwerte
$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{l=1}^n x_{ijl} \quad (16)$	
für $j = 1, \dots, q$	
2	Berechnung des Vektors $u = (u_b)$ , $b = 1, \dots, B$
$u_b = x_{ijl} - \bar{x}_{ij} \quad (17)$	
für $j = 1, \dots, q; l = 1, \dots, M$	
3	Berechnung von $c_B$ und $Q_B(u)$ laut Anlage und damit
$s_r^2 = c_B^2 \cdot Q_B^2(u) \cdot \frac{n}{n-1 + \frac{1,79}{q}} \quad (18)$	
C	Berechnung der robusten Schätzung $s_L^2$ der Prüfstellenvarianz
1	Berechnung des Gesamtmittelwertes
$\bar{x}_i = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^q \bar{x}_{ij} \quad (19)$	
2	Berechnung des Vektors $w = (w_j)$ , $j = 1, \dots, q$
$w_j = \bar{x}_{ij} - \bar{x}_i \quad (20)$	
3	Berechnung von $d_q$ und $Q_q(w)$ laut Anlage und damit
$s_L^2 = d_q \cdot Q_q^2(w) - \frac{s_r^2}{n} \quad (21)$	
bei $s_L^2 < 0$ ist $s_L^2 = 0$ zu setzen	

D	Berechnung der robusten Schätzung $s_R^2$ für die Vergleichsvarianz
$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2 \quad (22)$	
E	Berechnung der robusten Variationskoeffizienten bei
1	Wiederholbedingungen
$v_r = \frac{s_r}{\bar{x}_i} \quad (23)$	
2	Vergleichbedingungen
$v_R = \frac{s_R}{\bar{x}_i} \quad (24)$	
3	zwischen den Prüfstellen
$v_L = \frac{s_L}{\bar{x}_i} \quad (25)$	
F	Ausgabe
$s_r, s_R, s_L, v_r, v_R, v_L, \bar{x}_i$	

## 7.2 Statistische Kennwerte

Zur Erinnerung sei wiederholt, dass nur beim klassischen Verfahren aufgrund des Grubbs- oder Cochran-Tests bei einigen Prüflösen Prüfstellen eliminiert wurden. Die folgenden Ausführungen beschreiben die Auswirkungen der Elimination von Messwerten auf die Ergebnisse des klassischen Verfahrens und setzen sie in Relation zu den Ergebnissen des robusten Verfahrens, das im Gegensatz zu dem klassischen Verfahren mit dem kompletten Datensatz, inklusive Ausreißer, arbeitet.

### 7.2.1 Mittelwerte der Spaltzug- und Druckfestigkeit

Ausgangspunkt der Betrachtung sind die in der Abbildung 37 und Abbildung 38 vergleichend prüflösenspezifisch aufgetragenen **Mittelwerte der Spaltzug- bzw. Druckfestigkeit** der Bohrkernabschnitte für das klassische und robuste Auswerteverfahren. Die hierbei nur partiell erkennbaren Unterschiede sind ausschließlich auf die Eliminierung von Ausreißern beim klassischen Verfahren zurückzuführen. Während die Auswirkungen der Eliminierung der Ausreißer bei den Druckfestigkeiten bei den Prüflösen 6 und 8 auf deren Mittelwerte vernachlässigbar sind, stellt sich dies bei den Spaltzugfestigkeiten sehr differenziert dar.

So führt die Entfernung der Ausreißer bei den an der unteren Betonscheibe ermittelten Spaltzugfestigkeiten des Laborbetons bzw. Labormörtels zu keinen signifikanten Veränderungen des Mittel-

werts. Größere Unterschiede bezüglich der Mittelwerte stellen sich ausschließlich bei der Spaltzugfestigkeit der unteren und oberen Betonscheibe des Bestandsbetons beim Prüflös 4 ein.

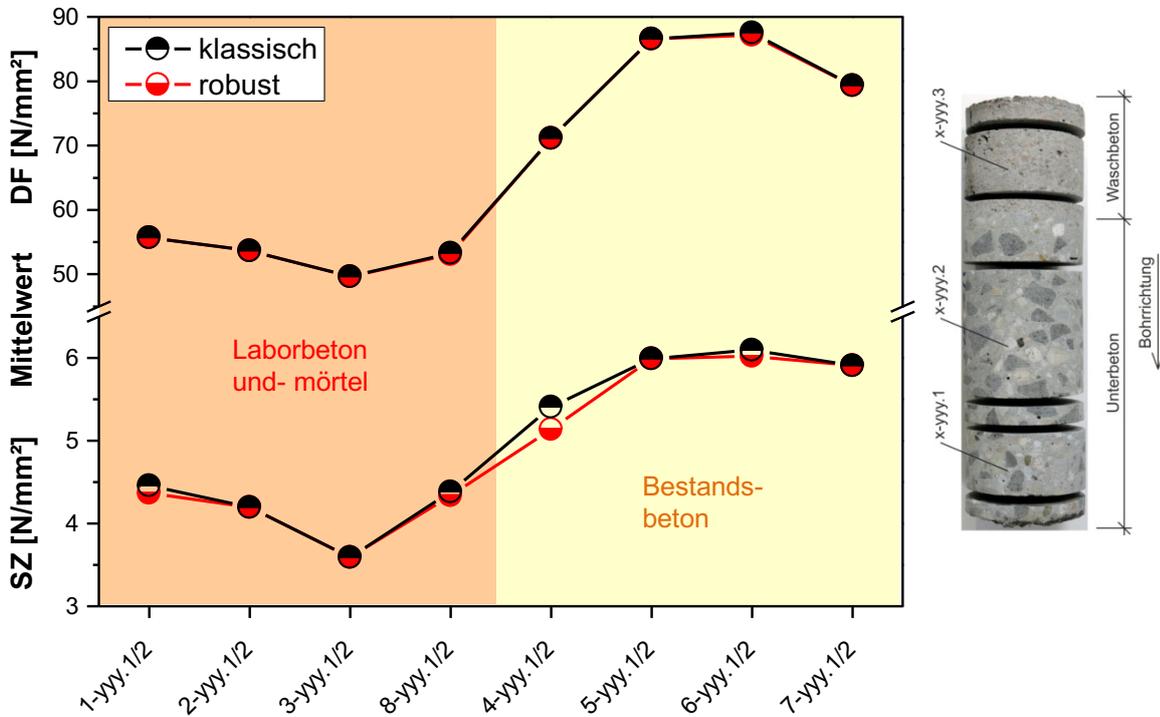


Abbildung 37: Vergleich der berücksichtigten Mittelwerte der Spaltzug- bzw. Druckfestigkeit der unteren Betonscheibe bzw. des mittleren Bohrkernabschnitts beim klassischen und robusten Verfahren

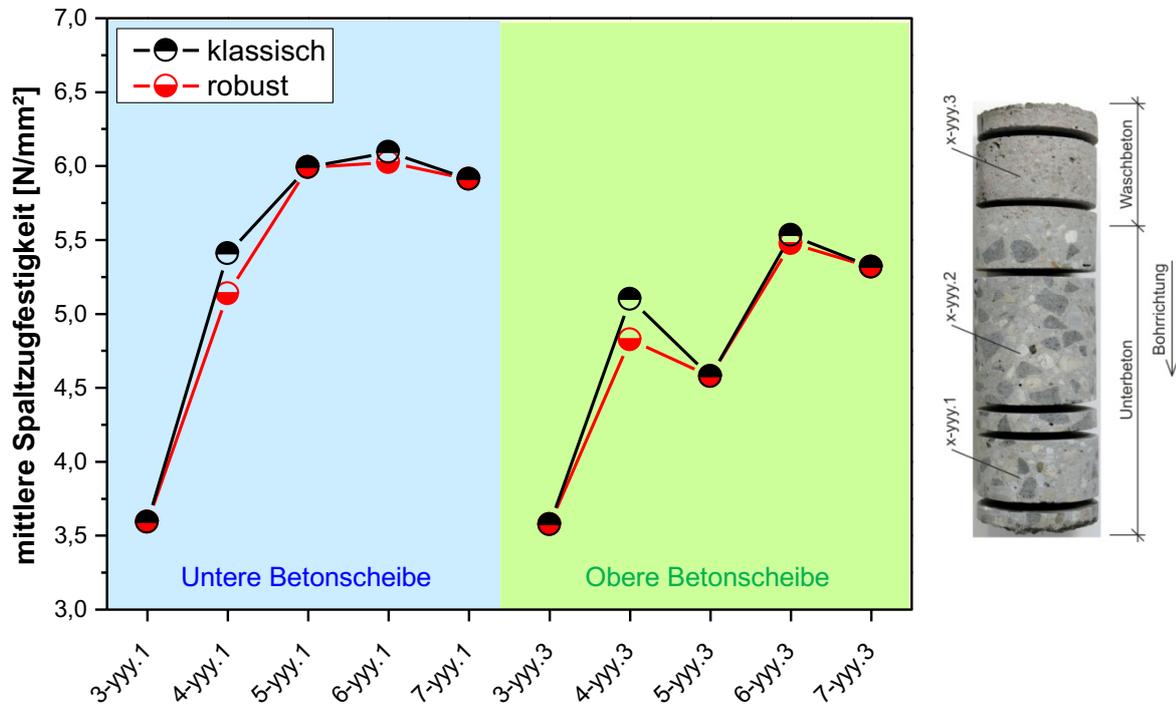


Abbildung 38: Vergleich der berücksichtigten Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit des Unter- und Waschbetons beim klassischen und robusten Verfahren

## 7.2.2 Standardabweichung und Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit

Die mit dem robusten und klassischen Verfahren prüflosspezifisch ermittelten Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Spaltzugfestigkeit unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen sind der Abbildung 39 und der Abbildung 40 zu entnehmen.

Zunächst werden diejenigen Prüflose betrachtet, bei denen Prüfstellen eliminiert wurden:

**Prüflos 8:** Es wurde die Prüfstelle 10 eliminiert, da sie den Cochran-Test nicht bestand, d. h. deren Messergebnisse waren zu breit gestreut (die Standardabweichung der Prüfstelle 10 war 3-fach so groß wie die durchschnittliche Standardabweichung aller Prüfstellen). Dies reduziert den  $s_r$ -Wert. Des Weiteren bestand die Prüfstelle 10 nur knapp den Grubbs-Test, da deren Mittelwert mit Abstand der kleinste aller Mittelwerte war. Dies führt somit auch zu einer Reduzierung des  $s_L$ -Wertes und somit in Addition zu einer Verminderung des  $s_R$ -Wertes. Daher ist es nicht erstaunlich, dass die  $s_r$ - und  $s_R$ -Werte des klassischen Verfahrens leicht unter denen des robusten Verfahrens liegen.

**Prüflos 4:** Es wurde sowohl bzgl. der oberen als auch der unteren Betonscheibe die Prüfstelle 2 eliminiert, da sie den Grubbs-Test in beiden Fällen nicht bestand, d. h. deren Prüfstellenmittelwert weicht jeweils in hohem Maße von den anderen Werten ab (der Prüfstellenmittelwert der Prüfstelle 2 war in beiden Fällen ca. nur das 0,35-fache des Gesamtmittelwertes), was zu einer Reduzierung des  $s_L$ -Wertes führt. Da andererseits die Messergebnisse der eliminierten Prüfstellen 2 jeweils die geringste Streuung besaßen, die der unteren Betonscheibe noch geringer als die der oberen Betonscheibe, ergibt sich eine Vergrößerung des  $s_r$ -Wertes in entsprechend unterschiedlicher Größe. Somit lässt sich nachvollziehen, warum die  $s_r$ -Werte des klassischen Verfahrens oberhalb der Werte des robusten Verfahrens liegen, und zwar für die untere Betonscheibe wesentlich deutlicher als für die obere. Die für beide Betonscheiben nahezu gleich große Reduzierung des  $s_L$ -Wertes führt durch die Gegenläufigkeit der beiden Varianzveränderungen letzten Endes dazu, dass der  $s_R$ -Wert des klassischen Verfahrens bei der unteren Betonscheibe oberhalb und bei der oberen Betonscheibe unterhalb des  $s_R$ -Wertes des robusten Verfahrens liegt.

**Prüflos 6:** Es wurde sowohl bzgl. der oberen als auch der unteren Betonscheibe die Prüfstelle 12 eliminiert, da sie den Cochran-Test in beiden Fällen nicht bestand. Auch waren deren Prüfstellen-

mittelwerte jeweils die kleinsten aller Mittelwerte, womit sich eine analoge Betrachtungsweise zum Prüflos 8 ergibt. Da die dortige Prüfstelle 10 aber in jeder Hinsicht wesentlich auffälliger war, fallen die Auswirkungen auf  $s_r$ ,  $s_L$  und  $s_R$  hier insgesamt deutlich geringer aus - für die obere Betonscheibe noch geringer als für die untere.

**Prüflos 1:** Es wurde die Prüfstelle 11 eliminiert, da sie den Grubbs-Test in Analogie zum Prüflos 4 nicht bestand (der Prüfstellenmittelwert der Prüfstelle 11 war das 0,74-fache des Gesamtmittelwertes), was zur Reduzierung des  $s_L$ -Wertes, aber moderater als bei Prüflos 4, führt. Absolut betrachtet ist der  $s_L$ -Wert recht klein, da die übrig gebliebenen Prüfstellen Mittelwerte von geringer Streuung aufweisen, was man beispielsweise anhand der relativ ausgeglichenen  $h$ -Werte erkennen kann, wenn man von der Prüfstelle 11 absieht. Ebenfalls wie in Prüflos 4, aber nicht so extrem wie dort, besaßen die Messergebnisse der Prüfstelle 11 eine geringe Streuung, was prinzipiell eine Vergrößerung des  $s_r$ -Wertes nach sich zieht, die aber so gering ausfällt, dass sich die  $s_r$ -Werte des klassischen und des robusten Verfahrens kaum unterscheiden. Prinzipiell ist auch hier wie bei Prüflos 4 eine Gegenläufigkeit der Varianzveränderungen festzustellen, die wegen des kleinen  $s_L$ -Wertes aber nicht deutlich wird, so dass sich auch die  $s_R$ -Werte des klassischen und des robusten Verfahrens kaum unterscheiden.

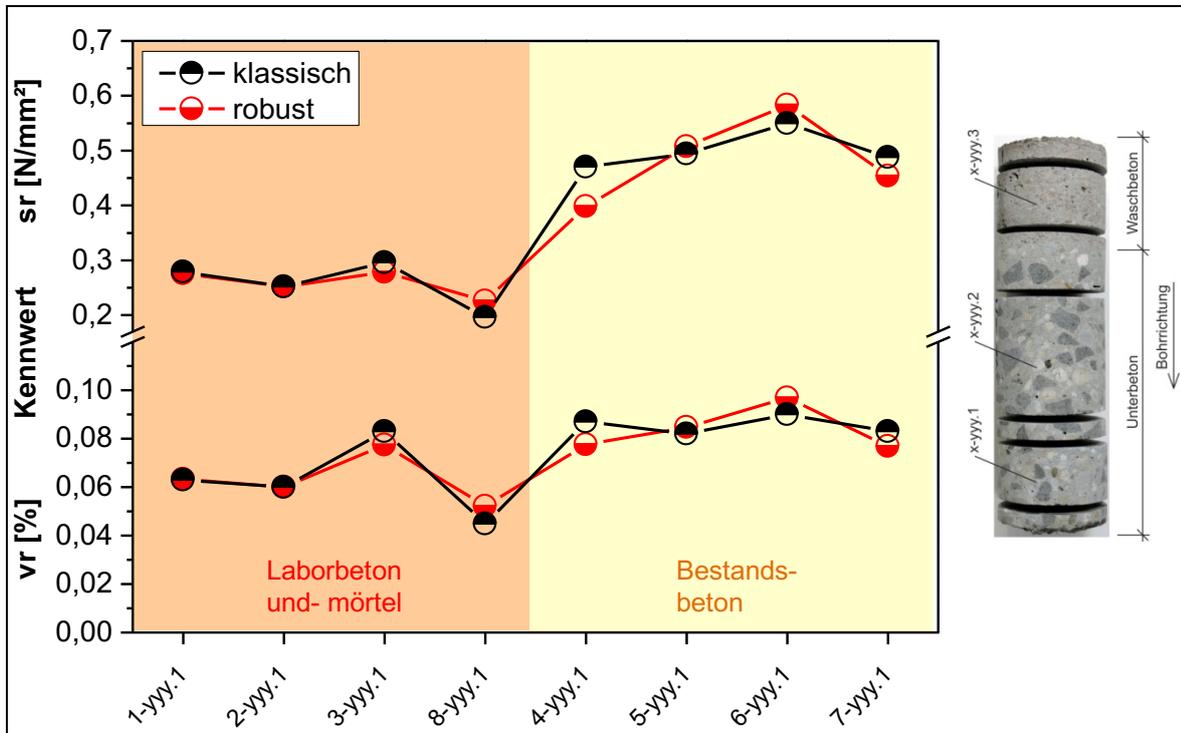
Zu den Prüflosen, bei denen keine Prüfstellen eliminiert wurden, lässt sich Folgendes sagen:

**Prüflos 2:** Es lässt sich feststellen, dass sich die  $s_r$  und  $s_R$ -Werte für das klassische und das robuste Verfahren kaum unterscheiden, da die Messergebnisse sehr homogen sind.

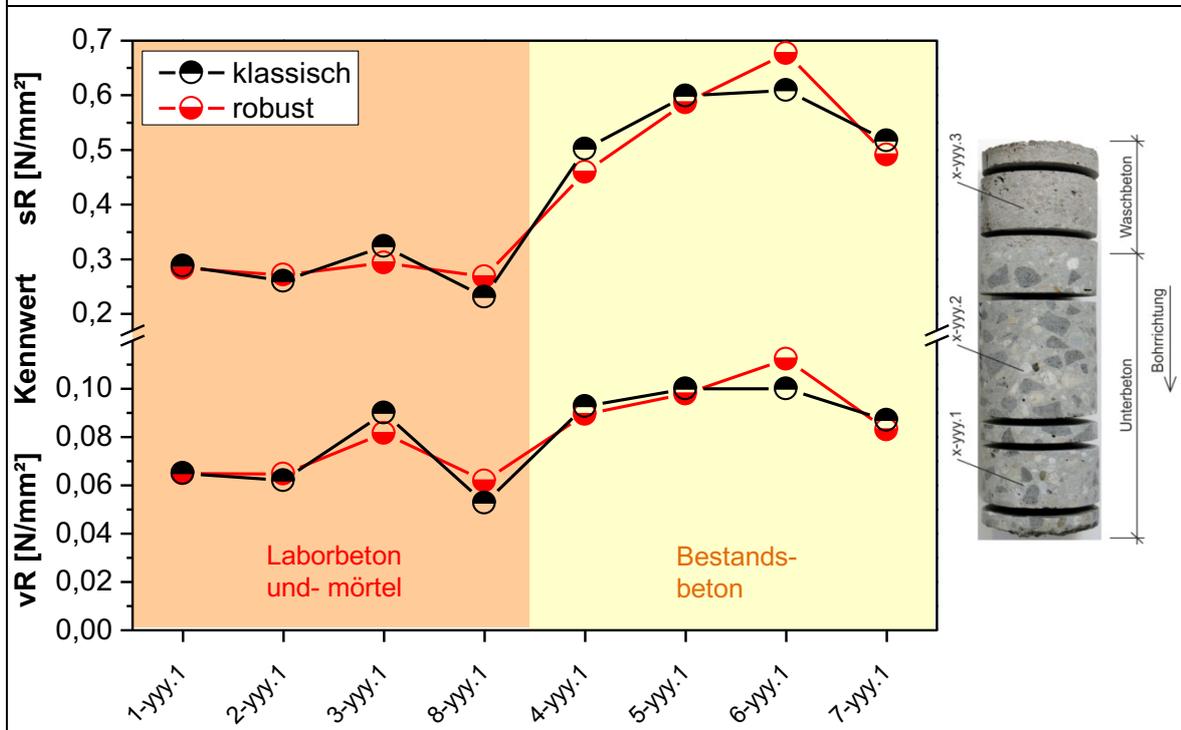
**Prüflos 3 und 5:** Die  $s_r$  bzw.  $s_R$ -Werte als Ergebnis der beiden Verfahren unterscheiden sich hier nur gering. Ob und in welchem Maße Differenzen auftreten, scheint von der Existenz und Anzahl von Fastausreißern abzuhängen. Dabei beeinflussen Fastausreißer bei den  $k$ -Werten den  $s_r$ -Wert und Fastausreißer bei den  $h$ -Werten den  $s_L$ -Wert.

**Prüflos 7:** Da die Varianz der  $k$ -Werte, obwohl man das an der Grafik nicht ohne Weiteres sieht, bei der unteren Betonscheibe doppelt so groß ist wie bei der oberen Betonscheibe, unterscheiden sich die  $s_r$ -Werte der beiden Verfahren bei der unteren Betonscheibe mehr als bei der oberen. Da die Varianz der  $h$ -Werte, (in der Grafik nicht ohne Weiteres erkennbar) bei der oberen Betonscheibe doppelt so groß ist wie bei der unteren Betonscheibe, unterscheiden sich die  $s_L$ -Werte der beiden Verfahren bei der oberen Betonscheibe mehr

als bei der unteren. Daraus erklären sich die Differenzen der  $s_R$ -Werte beider Betonscheiben unter Anwendung des klassischen und des robusten Verfahrens.

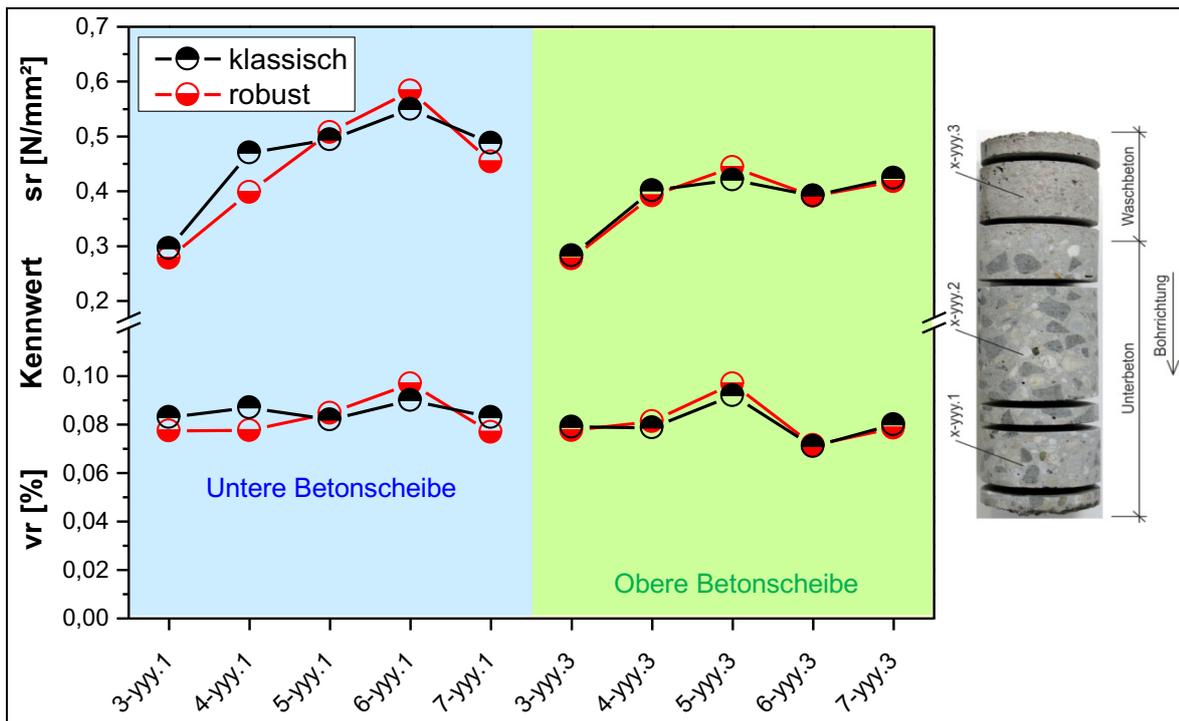


a. Wiederholbedingungen

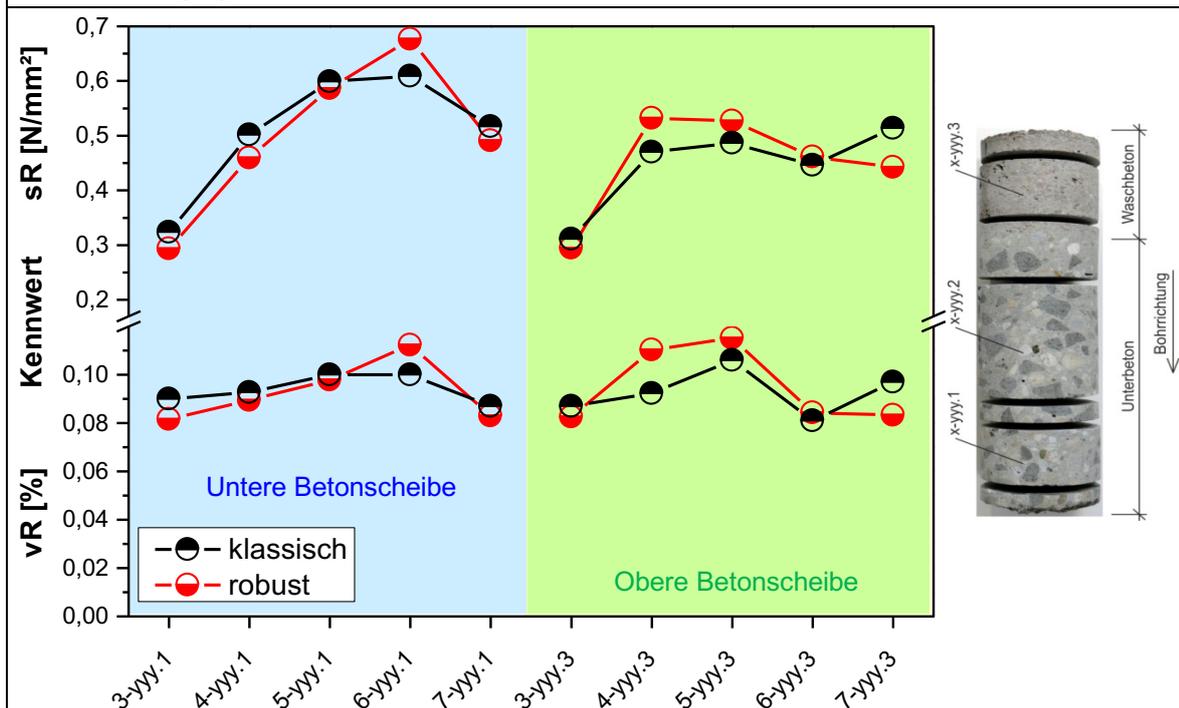


b. Vergleichbedingungen

**Abbildung 39:** Vergleich der mit klassischem und robustem Verfahren ermittelten Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Spaltzugfestigkeit der unteren Betonscheiben unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen



a. Wiederholbedingungen



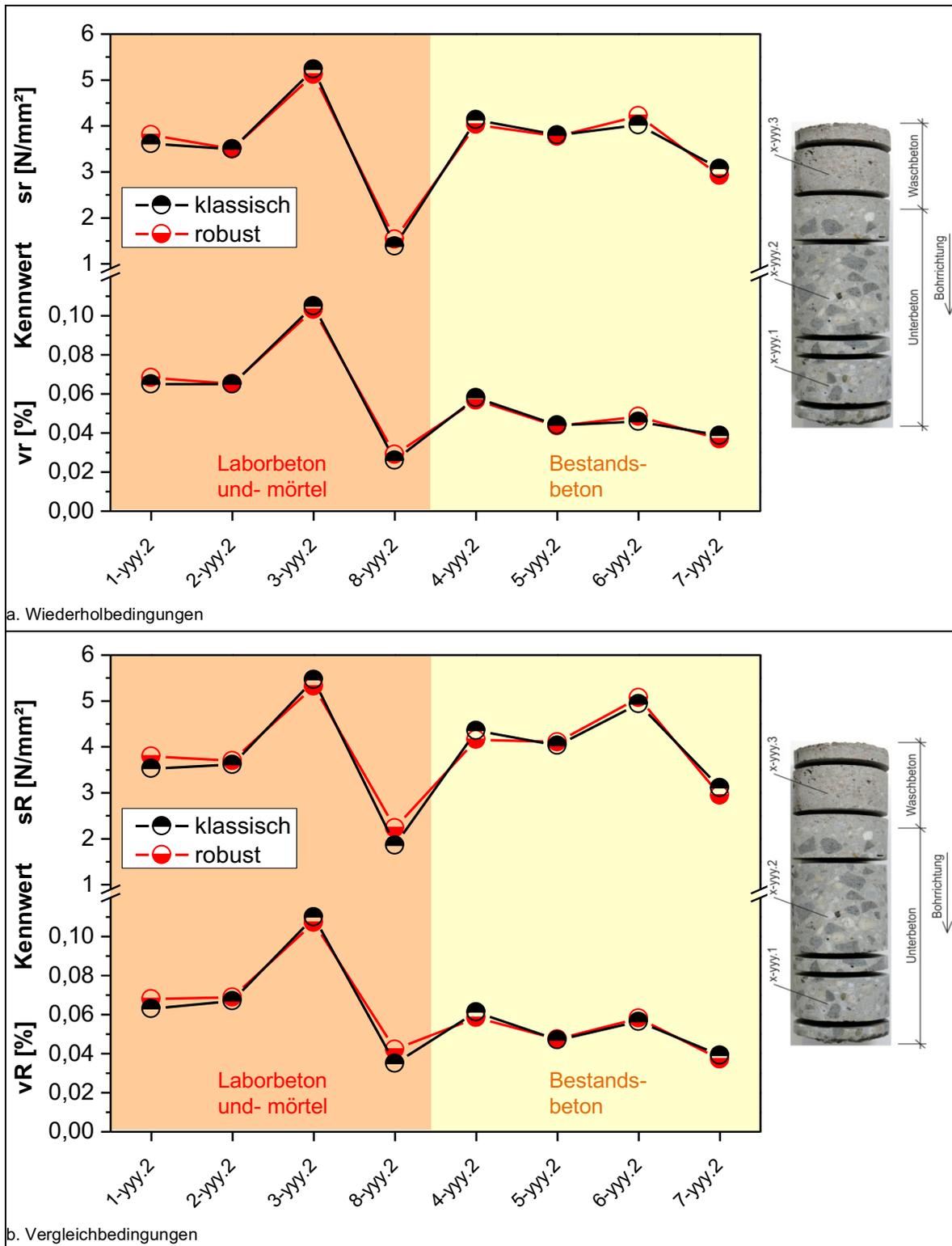
b. Vergleichbedingungen

**Abbildung 40:** Vergleich der mit klassischem und robustem Verfahren ermittelten Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Spaltzugfestigkeit der unteren und oberen Betonscheiben aus Bohrkernen der Fahrbahnplatten unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen

### 7.2.3 Standardabweichung und Variationskoeffizient der Druckfestigkeit

gen und Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen sind der Abbildung 41 zu entnehmen

Die mit dem robusten und klassischen Verfahren prüflosspezifisch ermittelten Standardabweichun-



**Abbildung 41:** Vergleich der mit klassischem und robustem Verfahren ermittelten Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen

Zunächst werden diejenigen Prüflose betrachtet, bei denen Prüfstellen eliminiert wurden:

**Prüflos 6 und 8:** Es wurde bei Prüflos 6 die Prüfstelle 3 und bei Prüflos 8 die Prüfstelle 5 eliminiert, da sie jeweils den Cochran-Test nicht bestanden, d. h. deren Messergebnisse waren zu breit gestreut (die Standardabweichung der Prüfstelle 3 und der Prüfstelle 5 waren ungefähr doppelt so groß wie die durchschnittliche Standardabweichung aller Prüfstellen des jeweiligen Prüfloses). Dies reduziert jeweils den  $s_r$ -Wert. Da beide herausgenommenen Prüfstellen auch jeweils die zweitkleinsten Mittelwerte besaßen, ergibt sich auch eine geringe Reduzierung des  $s_L$ -Wertes und somit in Addition eine geringe Verminderung des  $s_R$ -Wertes. Aus diesem Grund ist es nicht erstaunlich, dass die  $s_r$ - und  $s_R$ -Werte des klassischen Verfahrens leicht unter denen des robusten Verfahrens liegen.

**Übrige Prüflose:** Die  $s_r$ - bzw.  $s_R$ -Werte als Ergebnis der beiden Verfahren unterscheiden sich nur sehr gering, da es kaum Fastausreißer gibt und die Messdaten in jeder Hinsicht sehr homogen sind. Dies führt insbesondere beim Prüflos 1 aufgrund der sehr gleichförmigen Prüfstellenmittelwerte dazu, dass sich  $s_L=0$  ergibt, d.h.  $s_r = s_R$ .

### 7.3 Zusammenfassung

Für den Fall, dass die Messergebnisse eines Prüfloses sehr homogen sind, sind die Ergebnisse  $s_r$  und  $s_R$  beider Verfahren nahezu gleich.

Wurden Ausreißer eliminiert, so sind die Ergebnisse des robusten Verfahrens in der Regel et-was größer als die des klassischen Verfahrens.

Theoretische Begründungen aus der Statistik außer Betracht gelassen, erkennt man die Notwendigkeit der Elimination von Ausreißern beim klassischen Verfahren bereits daran, dass das Verfahren schon im Hinblick auf Fastausreißer sehr sensibel reagiert. Dies führt wiederum häufig zu Ergebnissen, die geringfügig größer sind als die des anderen Verfahrens, welches damit zu Recht als robust bezeichnet werden kann.

## 8 Prüfung der Ergebnisse auf Normalverteilung

### 8.1 Grundlagen

Die Anwendung der Ausreißer-Tests bei den klassischen Auswerteverfahren sowie das angewandte robuste Auswerteverfahren setzen eine normalverteilte Grundgesamtheit voraus. Aber auch bei der im folgenden Kapitel 9 diskutierten Ermittlung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit nach AL Sp-Beton [ALSP 2006] wird angenommen, dass die Spaltzugfestigkeiten der entnommenen Stichprobe normalverteilt sind.

Im vorliegenden Fall wurde zur Überprüfung der ermittelten Daten auf eventuelle Abweichungen von der Normalverteilung der Lilliefors-Test durchgeführt. Anhand des Lilliefors-Tests wird die Abweichung der empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  von der angenommenen Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$  bestimmt und mit den in Tabelle 19 angegebenen Grenzwerten zur Ablehnung der Nullhypothese (die empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  entspricht der angenommenen Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$ ) verglichen [Lill 1967]. Die Abweichung zwischen empirischer Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  und angenommener Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$  ergibt sich entsprechend Gleichung (26) zu:

$$D = \max |F(x_i) - S(x_i)| \quad (26)$$

Der hier angewandte Lilliefors-Test ist eine Modifikation des Kolmogorov-Smirnov-Tests für den Fall, dass der Mittelwert und die Standardabweichung der zu testenden Normalverteilung nicht bekannt sind und aus den empirischen Daten der Stichprobe geschätzt werden müssen [Lill 1967].

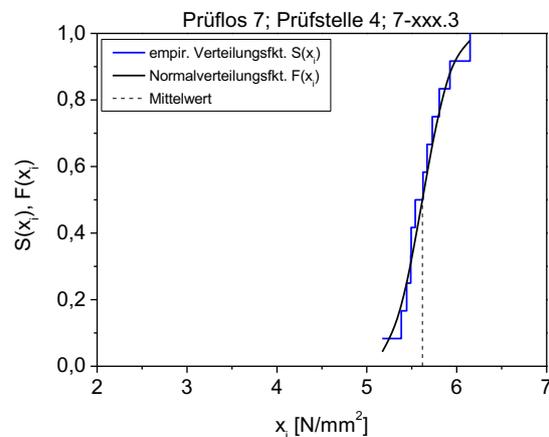
**Tabelle 19:** Grenzwerte für das Verwerfen der Nullhypothese nach [Lill 1967]

max. Abweichung $D_{\max}$		Signifikanzniveau $\alpha$				
		0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
Stichprobenumfang $n$	6	0,265	0,277	0,294	0,319	0,364
	12	0,199	0,212	0,223	0,242	0,275
	72	0,087	0,091	0,095	0,104	0,122
	78	0,083	0,087	0,091	0,100	0,117
	144	0,061	0,064	0,067	0,074	0,086
	156	0,059	0,062	0,065	0,071	0,083

## 8.2 Ergebnisse

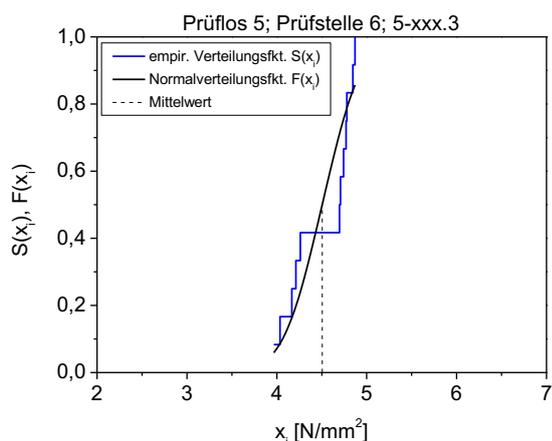
### 8.2.1 Spaltzugfestigkeit

Die empirische Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  sowie die angenommene Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$  sind in der Abbildung 42 und Abbildung 43 exemplarisch für zwei ausgewählte Prüflose der Spaltzugfestigkeit grafisch dargestellt. Die in Abbildung 42 für die Prüfstelle 4 im Prüflos 7 dargestellten Graphen zeigen eine gute Übereinstimmung und somit eine gute Approximation der empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  durch die angenommene Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$ .



**Abbildung 42:** Grafische Darstellung der empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  und der angenommenen Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$  am Beispiel der durch die Prüfstelle 4 ermittelten Daten der Spaltzugfestigkeit des Waschbetons des Prüfloses 7

Im Gegensatz zu der in Abbildung 42 dargestellten guten Übereinstimmung zwischen empirischer Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  und angenommener Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$  ist in Abbildung 43 für die durch die Prüfstelle 6 im Prüflos 5 ermittelten Werte der Spaltzugfestigkeit des Waschbetons keine gute Übereinstimmung beider Graphen erkennbar. Hier zeigt sich im Bereich des Mittelwertes eine starke Abweichung der empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  von der theoretischen Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$ .



**Abbildung 43:** Grafische Darstellung der empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  und der angenommenen Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$  am Beispiel der durch die Prüfstelle 6 ermittelten Daten der Spaltzugfestigkeit des Waschbetons des Prüfloses 5

Dies wird auch durch den in Tabelle 19 der maximalen Abweichung  $D_{\max}$  zugeordneten Grenzwertes des Signifikanzniveaus verdeutlicht. Die In-

terpretation des Ergebnisses erlaubt im vorliegenden Fall keine Annahme der Nullhypothese, da der Grenzwert zum Signifikanzniveau überschritten wird und somit die Nullhypothese (die empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  entspricht der angenommenen Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$ ) verworfen werden muss.

Aus den in Tabelle 20 aufgelisteten Ergebnissen des Lilliefors-Tests der ermittelten Spaltzugfestigkeiten kann geschlossen werden, dass die durch die Prüfstellen ermittelten Festigkeiten normalverteilt sind. Allein in 5 Fällen ergab sich aufgrund des durchgeführten Lilliefors-Tests mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Normalverteilung der Daten (Prüfstelle 3: Prüflos 8; Prüfstelle 6: Prüflos 3 WB, Prüflos 5 WB, Prüflos 7 UB; Prüfstelle 7: Prüflos 5 UB).

**Tabelle 20:** Ergebnisse des Lilliefors-Tests der ermittelten Spaltzugfestigkeiten

Prüfstelle	Laborbeton und -mörtel					Bestandsbeton							
	PL 1 1-xxx.1	PL 2 2-xxx.1	PL 3 3-xxx.1	PL 3 3-xxx.3	PL 8 8-xxx.1	PL 4 4-xxx.1	PL 4 4-xxx.3	PL 5 5-xxx.1	PL 5 5-xxx.3	PL 6 6-xxx.1	PL 6 6-xxx.3	PL 7 7-xxx.1	PL 7 7-xxx.3
1	20	20	10	1	20	10	20	20	20	20	20	20	20
2	20	20	20	20	20	20	20	10	20	20	20	20	20
3	20	20	5	5	<1	20	20	20	15	20	20	15	20
4	20	10	20	20	20	20	20	20	20	15	20	20	20
5	20	15	20	20	5	20	20	20	20	20	20	10	20
6	1	20	20	<1	20	10	20	1	<1	20	15	<1	20
7	20	10	5	15	10	20	20	<1	20	5	20	5	20
8	20	20	20	15	20	20	1	20	20	20	20	20	20
9	20	20	20	20	20	20	20	20	20	10	20	20	1
10	20	15	20	10	20	20	20	20	20	20	20	20	20
11	10	15	20	20	20	20	20	20	20	20	10	20	20
12	20	20	5	20	20	20	20	20	20	20	20	15	20
13	20	20	20	20	20	15	20	20	1	20	20	20	10
1-13#	20	20	20	20	1	10	20	5	5	20	20	20	15

**Legende:**

- $\alpha = 20$  oder  $15$  → sehr gute Approximation einer Normalverteilung
- $\alpha = 10$  oder  $5$  → üblich gute Approximation einer Normalverteilung
- $\alpha \leq 1$  → schlechte Approximation einer Normalverteilung → die Hypothese der Annahme einer Normalverteilung sollte verworfen werden

## 8.2.2 Druckfestigkeit

Die im Rahmen der Spaltzugprüfung nach AL Sp-Beton [ALSP 2006] zusätzlich ermittelten Druckfestigkeiten wurden, analog zu den Spaltzugfestigkeiten, auf Normalverteilung geprüft. Die Ergebnisse des Lilliefors-Test sind in Tabelle 21 aufgeführt. Eine gute Approximation der empirischen Verteilungsfunktion  $S(x_i)$  durch eine angenommene

Normalverteilungsfunktion  $F(x_i)$  ist auch bei den ermittelten Druckfestigkeiten gegeben. Lediglich in 2 Fällen ergab sich mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Normalverteilung der Daten (Prüfstelle 10, Prüflos 4; Prüfstelle 12, Prüflos 2). Auffallend ist hierbei auch, dass im Fall des Prüfloses 6 aufgrund des Ergebnisses des für den gesamten Stichprobenumfang (Daten aller Prüfstellen eines Prüfloses) durchgeführten Lilliefors-Tests keine

Normalverteilung der Daten unterstellt werden kann. Als möglicher Grund hierfür sind herstellungsbedingte Materialinhomogenitäten anzusehen, die sich in starken Streuungen der ermittelten Druckfestigkeiten widerspiegeln.

**Tabelle 21:** Ergebnisse des Lilliefors-Tests der ermittelten Druckfestigkeiten

Prüf- stelle	Laborbeton und -mörtel				Bestandsbeton			
	PL 1	PL 2	PL 3	PL 8	PL 4	PL 5	PL 6	PL 7
1	20	15	20	10	20	20	5	20
2	20	20	10	20	20	20	20	5
3	20	20	20	20	1	20	1	20
4	20	10	20	20	20	20	20	20
5	20	5	20	5	20	20	20	20
6	20	15	20	20	20	20	1	20
7	20	20	20	20	20	20	20	20
8	20	20	10	1	20	20	10	20
9	20	10	15	20	15	20	20	20
10	20	20	10	15	<1	20	20	20
11	20	5	20	20	20	20	1	20
12	20	<1	20	20	15	20	20	20
13	15	20	20	20	20	20	20	20
1-13*	20	20	1	1	20	20	<1	20

**Legende:**

- $\alpha = 20$  oder  $15$  → sehr gute Approximation einer Normalverteilung
- $\alpha = 10$  oder  $5$  → üblich gute Approximation einer Normalverteilung
- $\alpha \leq 1$  → schlechte Approximation einer Normalverteilung  
→ die Hypothese der Annahme einer Normalverteilung sollte verworfen werden

## 9 Ermittlung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit

### 9.1 Grundlagen

Basierend auf dem erfolgreichen Nachweis der Normalverteilung der gewonnenen Versuchsdaten wurde zusätzlich für jedes Prüflos die prüfstellen-spezifische charakteristische Spaltzugfestigkeit entsprechend der Festlegungen der AL Sp-Beton [ALSP 2006] für die statistische Auswertung von Prüfergebnissen bestimmt. Die Ermittlung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit der Prüflose 1, 2 und 8 orientiert sich an den Vorgaben zur Bestimmung des im Rahmen der Eignungsprüfung erforderlichen empirischen Mittelwerts  $f_{ctm}$  und ergibt sich zu:

$$f_{ctk,core} = \frac{f_{ctm}}{1 + k \cdot V} \quad (27)$$

Unter Verwendung von Gleichung (27) wurden für die Prüflose 1, 2 und 8 die durch die jeweilige Prüfstelle anzusetzende charakteristische Spaltzugfestigkeit gemäß der Einordnung nach Tabelle 1 [ALSP 2006] ermittelt. Aufgrund der geringeren Probenanzahl der Prüflose 1, 2 und 8 ( $n = 6$ ) ergibt sich der k-Faktor zu  $k = 2,950$  [GRAF 1987]. Für den in Gleichung (27) zu verwendenden Variationskoeffizienten  $V$  wurde der im Rahmen des Ringversuchs ermittelte prüfstellen- und prüflosspezifische Wert verwendet.

Die Auswertung der Ergebnisse der Prüflose 3 bis 7 erfolgte entsprechend den Vorgaben der AL Sp-Beton zur Abschätzung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit im Rahmen der Übereinstimmungskontrolle. Das 5 % Quantil errechnet sich dabei wie folgt:

$$f_{ctk,core} = f_{ctm,core} - k \cdot s \quad (28)$$

mit  $s$  als prüfstellen- und prüflosspezifischer Standardabweichung der Spaltzugfestigkeit der geprüften Bohrkernscheiben und  $k$  als Faktor nach [GRAF 1987]. Aufgrund des von der AL Sp-Beton [ALSP 2006] abweichenden Probenumfangs ( $n = 12$ ) ergibt sich der in Gleichung (28) verwendete k-Faktor zu  $k = 2,397$ .

### 9.2 Ergebnisse

Die prüflosspezifisch ermittelten charakteristischen Spaltzugfestigkeiten der einzelnen Prüfstellen sind der Tabelle 22 zu entnehmen. Dabei sind die Minimalwerte rot und die Maximalwerte grün beim jeweiligen Prüflos hinterlegt. Die mit einer Klammer versehenen Werte repräsentieren die Prüfstellen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit beim jeweiligen Prüflos als Ausreißer identifiziert wurden. Zusätzlich sind in der Tabelle die prüflosspezifischen Mittelwerte der charakteristischen Spaltzugfestigkeit ohne und mit Berücksichtigung der Ausreißer aufgeführt.

Tabelle 22: Prüfstellenspezifische Darstellung der errechneten charakteristischen Spaltzugfestigkeiten der einzelnen Prüfstellen

Prüf- stelle	Laborbeton und -mörtel					Bestandsbeton							
	PL 1	PL 2	PL 3		PL 8	PL 4		PL 5		PL 6		PL 7	
	xxx.1	xxx.1	xxx.1	xxx.3	xxx.1	xxx.1	xxx.3	xxx.1	xxx.3	xxx.1	xxx.3	xxx.1	xxx.3
1	3,78	3,35	2,94	2,85	3,82	4,12	4,56	5,51	3,43	4,94	4,88	5,06	4,40
2	3,97	3,80	3,05	3,13	3,98	(4,60)	(3,84)	4,82	3,69	4,43	4,23	4,43	4,23
3	3,74	3,77	2,73	3,17	3,77	4,51	4,76	5,55	4,15	5,23	5,27	4,82	4,93
4	3,83	3,46	3,00	2,98	4,22	4,61	4,31	4,78	3,65	5,06	5,00	5,41	4,99
5	4,53	3,59	2,98	2,57	3,92	4,53	3,93	4,16	3,16	3,80	3,90	4,72	3,67
6	3,47	3,59	3,17	2,77	3,81	4,87	3,92	5,23	3,68	4,47	4,86	4,78	4,64
7	3,66	3,24	2,83	2,93	3,86	3,66	4,30	4,17	3,05	4,69	4,45	4,26	3,69
8	3,71	3,75	2,83	2,93	3,62	4,95	4,09	5,39	4,38	5,53	4,25	4,55	4,25
9	3,62	3,62	2,91	2,72	4,13	4,52	4,34	5,08	3,86	5,27	4,62	5,14	4,68
10	3,92	3,53	3,20	2,72	(2,82)	3,66	3,47	3,45	2,47	4,40	4,23	4,79	4,72
11	(2,90)	3,49	2,51	2,76	3,71	4,24	3,84	4,89	3,83	5,00	4,98	4,44	3,72
12	3,34	3,45	2,47	2,96	3,84	3,55	3,98	4,96	3,53	(2,30)	(3,00)	5,21	4,50
13	4,04	3,86	3,20	3,23	4,20	4,64	4,06	4,96	3,96	4,45	4,38	4,55	3,82
1-13	3,80 (3,73)	3,58	2,91	2,90	3,91 (3,82)	4,34	4,11	4,84	3,60	4,77 (4,58)	4,59 (4,47)	4,78	4,33

Legende: Minimalwert Maximalwert (...) identifizierte Ausreißer

## 10 Begleitende Untersuchungen

Der innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführte Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton [ALSP 2006] wurde durch zusätzliche Untersuchungen begleitet. Die begleitenden Untersuchungen wurden größtenteils durch die Bachelorarbeit von Herrn Daniel Frost [FROST 2012] an der BAM bearbeitet. Durch die Begleituntersuchungen wurde das Bruchverhalten unter statischer Spaltzugbeanspruchung mit Hilfe innovativer Prüftechnik analysiert. Dabei wurden die Rissbildungsprozesse durch optische Verformungsanalyse und durch die Analyse der Schallemissionsaktivität sowie der Ultraschalllaufzeit untersucht. Im Fokus der begleitenden Untersuchungen stand dabei der Einfluss der Lasteinleitung auf das Bruchverhalten unter Spaltzugbelastung. Als weiterer Faktor wurde der Einfluss unterschiedlicher Vorkonditionierung (wassergesättigte Proben, Lagerung unter Normklima  $20 \pm 2$  °C und  $65 \pm 5$  % relativer Luftfeuchte) untersucht.

### 10.1 Untersuchungsprogramm

#### 10.1.1 Probekörper

Die begleitenden Untersuchungen zum Bruchverhalten unter statischer Spaltzugbeanspruchung erfolgten überwiegend an Rückstellproben des Prüfloses 4, um vergleichbare Bedingungen seitens der verwendeten Betonrezeptur zu gewährleisten. Lediglich für einzelne Parameterstudien wurden Probekörper des Prüfloses 7 verwendet. Für einen umfassenden Vergleich der Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Lagerungsbedingungen (Abschnitt 10.4) wurden Probekörper des Prüfloses 1 sowie eines anderen Autobahnabschnittes verwendet. Hierbei handelt es sich um Proben der BAB A14 km 122,5.

#### 10.1.2 Modifikation des Versuchsaufbaus

Der im Rahmen der begleitenden Untersuchungen verwendete Versuchsaufbau entspricht nicht der in der AL Sp-Beton [ALSP 2006] vorgeschriebenen Spaltzugvorrichtung. Eine Modifikation des Versuchsaufbaus war aufgrund auftretender Störgeräusche, die durch erste Voruntersuchungen zur Verwendung der SEA detektiert wurden, notwendig. Als Ursache der Störgeräusche kommen die beiden im oberen Teil der Prüfvorrichtung befindlichen Linearlager in Betracht. Diese Lager dienen der Führung entlang der beiden äußeren Säulen

(siehe Abbildung 1). Durch [FROST 2012] wurde daher der in Abbildung 44 dargestellte Versuchsaufbau verwendet.

Zur Durchführung der Spaltzugversuche wurden die obere und untere Lasteinleitungsschiene der ursprünglichen Prüfvorrichtung direkt an der Prüfmaschine befestigt. Die gelenkige Lagerung der oberen Lasteinleitungsschiene entspricht dabei den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006]. Des Weiteren ist ein Austausch der Lasteinleitungsschienen für Versuche gemäß den Vorgaben der AL Sp-Beton oder DIN-EN 12390-6:2010 möglich. Die Zentrierung der Proben erfolgte entsprechend den Vorgaben der DIN-EN 12390-6:2010 durch zwei axial gegenüberliegende Linien, um eine mittige Lasteinleitung in den Probekörper zu gewährleisten.

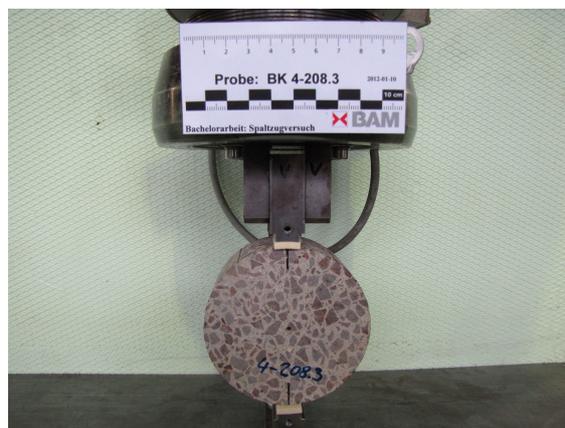


Abbildung 44: Modifizierter Versuchsaufbau von [FROST 2012] zur Durchführung der Spaltzugversuche

#### 10.1.3 Hochgeschwindigkeitskamera

Für eine genauere Analyse lokaler Rissbildungsprozesse wurde der Bruchprozess auf einer Stirnseite der Spaltzugprobe mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera (HG-Kamera) verfolgt. Hierfür wurden zwei Kamerasysteme mit unterschiedlicher örtlicher und zeitlicher Auflösung verwendet. Zum Einsatz kamen:

- Kamerasystem CR 1000x2 der Firma Optronis mit einer maximalen Bildfrequenz von 5 kHz bei einer maximalen Bildauflösung von 150 x 400 Pixeln
- Kamerasystem HPV-1 der Firma Shimadzu mit einer maximalen Bildfrequenz von 1 MHz bei einer maximalen Bildauflösung von 200 x 380 Pixeln begrenzt auf eine maximale Bildanzahl von 100 Aufnahmen

### 10.1.4 Photogrammetrische Verformungsanalyse

Die Visualisierung der Oberflächenverformungen erfolgte durch photogrammetrische Verformungsanalyse. Hierzu wurde ein System der Firma GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH eingesetzt. Das Messsystem besteht aus einer Kamera (Systemkonfiguration 5 M) mit einer Bildauflösung von 2448 x 2050 Pixel bei einer maximalen Bildfrequenz von 15 Hz zur optischen Erfassung der Probenoberfläche und dem Software-Tool ARAMIS zur Auswertung der Aufnahmen. Das Software-Tool erlaubt dabei nicht nur die Auswertung der durch das Kamerasystem aufgenommenen Bilder, sondern auch den Import externer Bildsequenzen. Somit können die Aufnahmen der HG-Kamera durch ARAMIS analysiert werden und zusätzliche Informationen zum Bruchverhalten gewonnen werden. Eine quantitative Analyse der Oberflächenverformung ist bei einem Import externer Bildsequenzen nicht möglich, da hierfür eine vorherige Kalibrierung des Messsystems notwendig ist. Somit sind bei einem Import externer Bilder nur Aussagen zur qualitativen Verteilung der Verformungen auf der Probekörperoberfläche gegenüber dem Ausgangszustand möglich. Für eine quantitative Bestimmung der Oberflächenverformungen ist daher eine entsprechende Kalibrierung des Messsystems notwendig.

Die Auswertung der während des Versuchs aufgezeichneten Bildsequenzen erfolgt nach Verfahren der digitalen Bildkorrelation. Hierzu ist es erforderlich, dass auf der zu analysierenden Probenoberfläche durch das System kontrastreiche Strukturen detektiert werden können. Dies ist prinzipiell durch die heterogene Gefügestruktur (Zementsteinmatrix, Zuschläge) des Betons gegeben. Die optische Erfassung der Probenoberfläche kann jedoch durch das Aufbringen eines stochastischen Punktemusters verbessert werden. Hierzu wurden die zu untersuchenden Proben mit einem weißen Lack grundiert und anschließend mit schwarzem Lack besprüht. Das sich dabei ergebende stochastische Punktemuster ist beispielhaft in Abbildung 45 dargestellt.

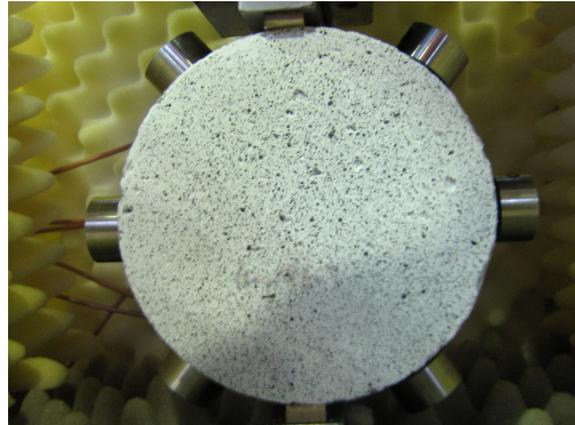


Abbildung 45: Probekörper mit aufgebrachtem Sprühmuster und Sensoren der SEA

### 10.1.5 Querdehnungsmessung

Zusätzlich zur photogrammetrischen Verformungsanalyse wurden an ausgesuchten Probekörpern die Querdehnungen unter statischer Spaltzugbeanspruchung auf konventionelle Weise mittels Dehnmessstreifen (DMS) erfasst. Verwendet wurden DMS des Typs PL-60-11 der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. mit einer Messlänge von 60 mm. Die DMS wurden mittig, mit ihrer Messachse senkrecht zur Belastungsrichtung, auf beiden Stirnseiten der Probekörper appliziert und in eine Wheatstonesche Messbrücke eingebunden. Die durch die Querdehnung des Probekörpers infolge seiner Widerstandsänderung hervorgerufene Verstimmung der Messbrücke wurde durch einen Messverstärker MGC der Firma HBM gemessen und durch entsprechende Umrechnung in die adäquate Querdehnung transformiert.

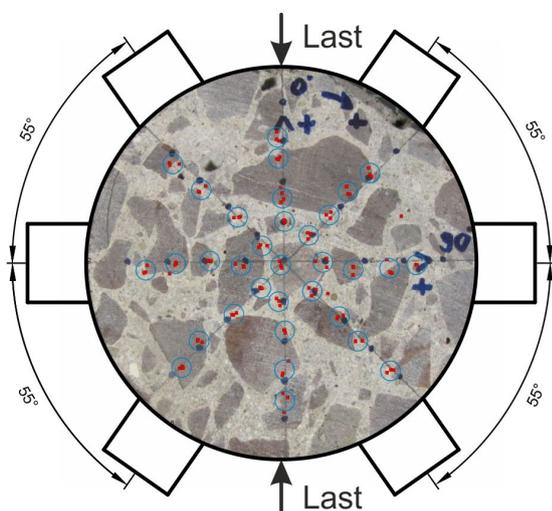
### 10.1.6 Schallemissionsanalyse

Für die Analyse der beim Spaltzugversuch auftretenden Rissbildungsprozesse kam die Schallemissionsanalyse (SEA) zum Einsatz. Die SEA nutzt die bei der Rissbildung in elastischen Körpern auftretenden Materialverschiebungen entlang der Rissufer. Hierbei wird ein Teil der im belasteten Probekörper gespeicherten potenziellen Energie in kinetische Energie umgewandelt, wobei es zur Ausbreitung von elastischen Wellen (Schallwellen) kommt [WEISE 2006]. Die Frequenz und der Energieinhalt der ausgestrahlten Schallwellen erlauben dabei Rückschlüsse auf die Art der Rissentstehung sowie der Rissausbreitung.

Mittels geeigneter Sensoren können die auftretenden akustischen Wellen an der Oberfläche registriert und in elektrische Signale umgewandelt wer-

den. Bei Verwendung von mindestens vier Sensoren kann durch eine Auswertung der Laufzeitunterschiede des durch die Sensoren erfassten Schallereignisses eine Ortung der Schallquelle und somit eine Lokalisierung der Rissentstehung erfolgen [WEISE 2006]. Bei an der BAM durch [FROST 2012] durchgeführten Vorversuchens stellte sich heraus, dass sich durch die Anordnung von sechs Sensoren gut reproduzierbare Ortungsergebnisse erzielen lassen. Hierzu wurden im Rahmen der Kalibrierung der Sensoren (ASTM E976-10) zusätzliche Untersuchungen zur Ortungsgenauigkeit durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ortungsgenauigkeit sind in Abbildung 46 zusammen mit der Sensoranordnung dargestellt. Die Untersuchungen von [FROST 2012] zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen realer (an den blauen Rasterpunkten durch den Bleistiftminentest ausgelösten Schallereignissen) und georteter Schallquelle (rote Punkte). Auffallend ist jedoch, dass es im Mantelbereich zu einem systematischen Fehler bei der Lokalisierung der betreffenden Schallquellen kommt. Der Grund hierfür liegt in der geringen räumlichen Ausdehnung des Probekörpers in Längsrichtung und der damit im Bereich nahe der Mantelfläche verbundenen Winkelverschiebung.



**Abbildung 46:** Ergebnisse der Untersuchungen zur Ortungsgenauigkeit mit Darstellung der Sensoranordnung (55°) [FROST 2012]

Für die Beurteilung der Ergebnisse der Schallortung spielt dieser Fehler im Randbereich nur eine geringfügige Rolle, da die größte SE-Aktivität in Probenmitte, entlang der sich einstellenden Bruchfläche, erwartet wird. Die Aufzeichnung der Schallemissionen erfolgte durch das System AMSY-5 der Firma Vallen System GmbH. Als Sensoren

kamen 150 kHz Breitbandsensoren vom Typ VS150-M zum Einsatz.

### 10.1.7 Ultraschallgeschwindigkeit

Ein weiterer Indikator für die Beurteilung der Gefügeschädigung eines Materials ergibt sich aus der Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit (US-Geschwindigkeit). Hierzu werden auf dem Probekörper ein Sender und ein Empfänger in Transmissionsanordnung befestigt. Das Durchschallen der Probe mit einem US-Impuls wird durch den Empfänger registriert und ermöglicht die Bestimmung der US-Laufzeit. Infolge einer äußeren Belastung (Spaltzugbeanspruchung) kommt es im beanspruchten Material zur Ausbildung von Mikrorissen. Durch die Bildung von Mikrorissen verlängert sich einerseits der Weg des US-Impulses, da dieser die entstandenen Risse umwandert und andererseits reduziert sich die Geschwindigkeit des US-Impulses in den mit Luft gefüllten Rissen aufgrund der geringeren Schallgeschwindigkeit in Luft. Beide Faktoren führen zu einer Verlängerung der US-Laufzeit bei zunehmender Gefügeschädigung und somit zu einer Verringerung der US-Geschwindigkeit.

Für das Bestimmen der US-Geschwindigkeit wurden durch [FROST 2012] die Sensoren (Typ VS150-M) der SEA verwendet. Die Sensoren wurden in horizontaler Achse quer zur Lasteinleitung platziert, so dass eine Bestimmung der US-Geschwindigkeit rechtwinklig zur erwarteten Bruchfläche möglich ist. Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen an den Versuchsaufbau kamen zwei verschiedene Systeme zum Einsatz:

- AMSY-5 der Firma Vallen in Verbindung mit dem Versuchsaufbau der SEA für einen direkten Vergleich der Ergebnisse der SEA und US-Geschwindigkeit. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung beider Messverfahren war eine Modifikation des Prüfregimes notwendig. Nach dem Aufbringen der Vorlast wurden die Sensoren an die Proben angekoppelt und auf ihre gleichmäßige Empfangsempfindlichkeit überprüft. Anschließend wurde die Probe entsprechend der vorgegebenen Belastungsgeschwindigkeit belastet. Beginnend ab einer Last von 5 kN wurde die erreichte Laststufe alle 2,5 kN kraftgesteuert für 22 Sekunden gehalten. In der verbleibenden Zeit wurde über die beiden gegenüberliegenden Sensoren die US-Geschwindigkeit senkrecht zur Lasteinleitungsebene bestimmt.

- USPC 3041 der Firma Dr. Hillger Ultraschall-Prüftechnik. Bei diesem Versuchsaufbau erfolgt keine Erfassung der Schallemissionen. Die Belastung der Probe erfolgt daher kontinuierlich und wurde durch die Messung der US-Geschwindigkeit mit einer Messrate von 6,67 bzw. 10 Hz begleitet.

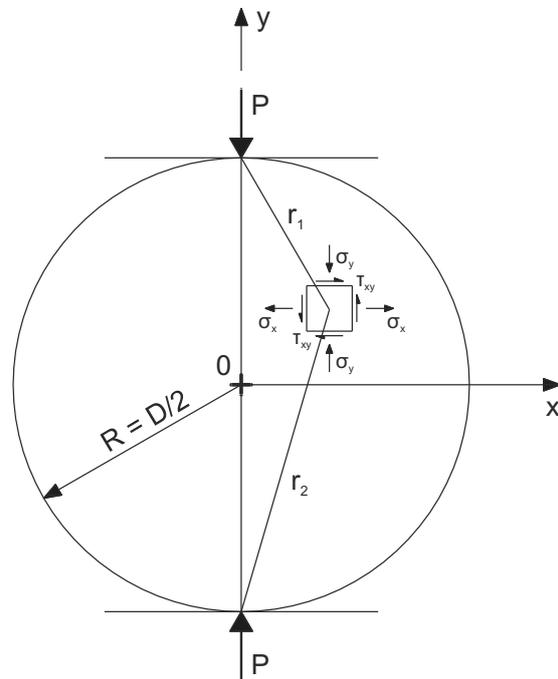
## 10.2 Analyse des Bruchverhaltens

### 10.2.1 Versagensmechanismen

Eine umfangreiche phänomenologische Beschreibung der beim Spaltzugversuch auftretenden Versagensmechanismen ist in der Literatur zu finden. Aussagen zum Bruchverhalten sind den Veröffentlichungen von [WRIGHT 1955], [MITCHELL 1961], [BONZEL 1964] und [ROCCO 1999] zu entnehmen.

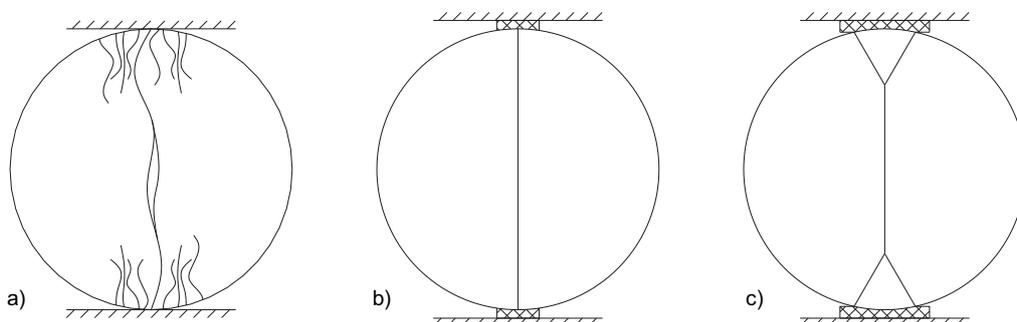
Wie bereits in Abschnitt 3 kurz erläutert, kommt es aufgrund der diametralen Belastung des Probekörpers zur Ausbildung eines zweiachsigen Spannungszustandes. Unter der Annahme eines ebenen Spannungszustandes beschreibt [MITCHELL 1961] theoretisch die innerhalb einer dünnen Kreisscheibe auftretenden Spannungen (siehe Abbildung 47). Entsprechend der durch [MITCHELL 1961] angegebenen Gleichungen ergeben sich die kleinsten Normalspannungen auf dem Kreisumfang bei  $x = R$ , wohingegen die größten Normalspannungen im Mittelpunkt der Kreisscheibe auftreten. Entlang der  $y$ -Achse, in Richtung der Lasteinleitung, sind die Zugspannungen konstant. Die Druckspannung wächst jedoch entlang der  $y$ -

Achse bis zu den Angriffspunkten der Last auf dem Kreisumfang auf  $\sigma_y = \text{an}$ .



**Abbildung 47:** Kreisscheibe mit diametral angreifenden Einzellasten und resultierende Spannungen [MITCHELL 1961]

[MITCHELL 1961] unterscheidet drei mögliche Versagensformen bei der Spaltzugprüfung (siehe Abbildung 48). Der sich im Idealfall einstellende Zugbruch ist in Abbildung 49 dargestellt. Bei Verwendung sehr breiter Lasteinleitungstreifen kommt es im Bereich der Lasteinleitung zur Ausbildung von Schubbrüchen (siehe Abbildung 50).



**Abbildung 48:** Bruchversagen in Abhängigkeit der Breite des Lasteinleitungstreifens nach [MITCHELL 1961]

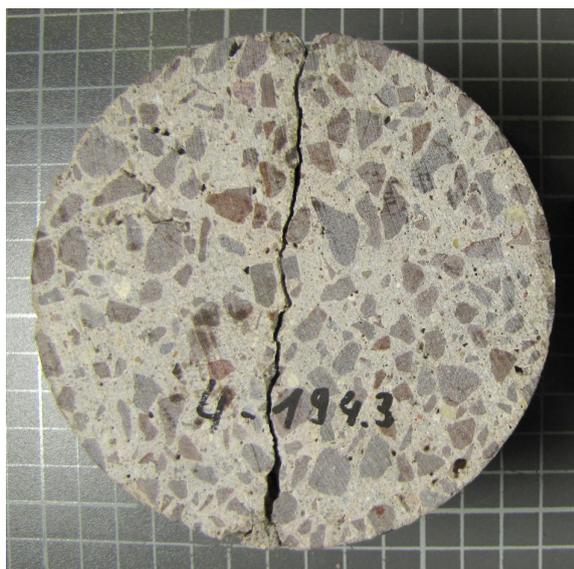


Abbildung 49: Zugbruch einer Spaltzugprobe



Abbildung 50: Schubbruch im Bereich der oberen Lasteinleitung einer Spaltzugprobe

### 10.2.2 Hochgeschwindigkeitskamera

Die durch [FROST 2012] vorgenommene Auswertung der durch die beiden verwendeten Kamerasysteme aufgezeichneten Bilder hat ergeben, dass durch das Kamerasystem der Firma Optronics aufgrund der geringen zeitlichen und örtlichen Auflösung der Ursprung der Rissbildung nicht lokalisiert werden konnte. Die Auswertung durch [FROST 2012] zeigte, dass innerhalb einer Bildfolge ( $\Delta t \approx 0,2$  ms bei 5 kHz) der Trennriss über die gesamte Höhe des Probekörpers verlief.

Das Kamerasystem der Firma Shimadzu verfügt über eine ähnliche örtliche Auflösung wie das System der Firma Optronics, erlaubt aber die Aufzeichnung des Versagensprozesses mit einer höheren Bildfrequenz von bis zu 1 MHz. Der begrenzende Parameter dieses Kamerasystems liegt jedoch in der Aufzeichnung von maximal 100 Bildern, was bei einer Bildfrequenz von 20 kHz in einem Zeitfenster von 5 ms resultiert.

Zur Auslösung der Kamera wurde durch [FROST 2012] auf den Probekörper ein Silberleitlack mäanderförmig aufgetragen (siehe Abbildung 51). Durch die Öffnung des elektrischen Schaltkreises infolge des eintretenden Trennrisses wurde die Hochgeschwindigkeitskamera ausgelöst. Die weitere Auswertung der Aufnahme mit einer Bildfrequenz von 20 kHz zeigt jedoch, dass dieser Versuchsaufbau nicht sensibel genug ist, sodass durch [FROST 2012] das Versagen der Probe mit einer Bildfrequenz von 1 kHz aufgezeichnet wurde. Diese Bildfolge wurde durch [FROST 2012] unter Verwendung des Softwaresystems Aramis zur weiteren Analyse der Oberflächenverformungen ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Abschnitt 10.2.3 erläutert.

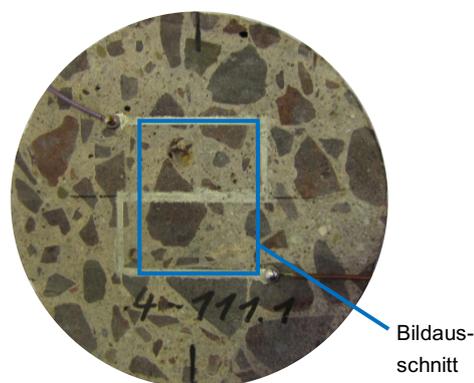
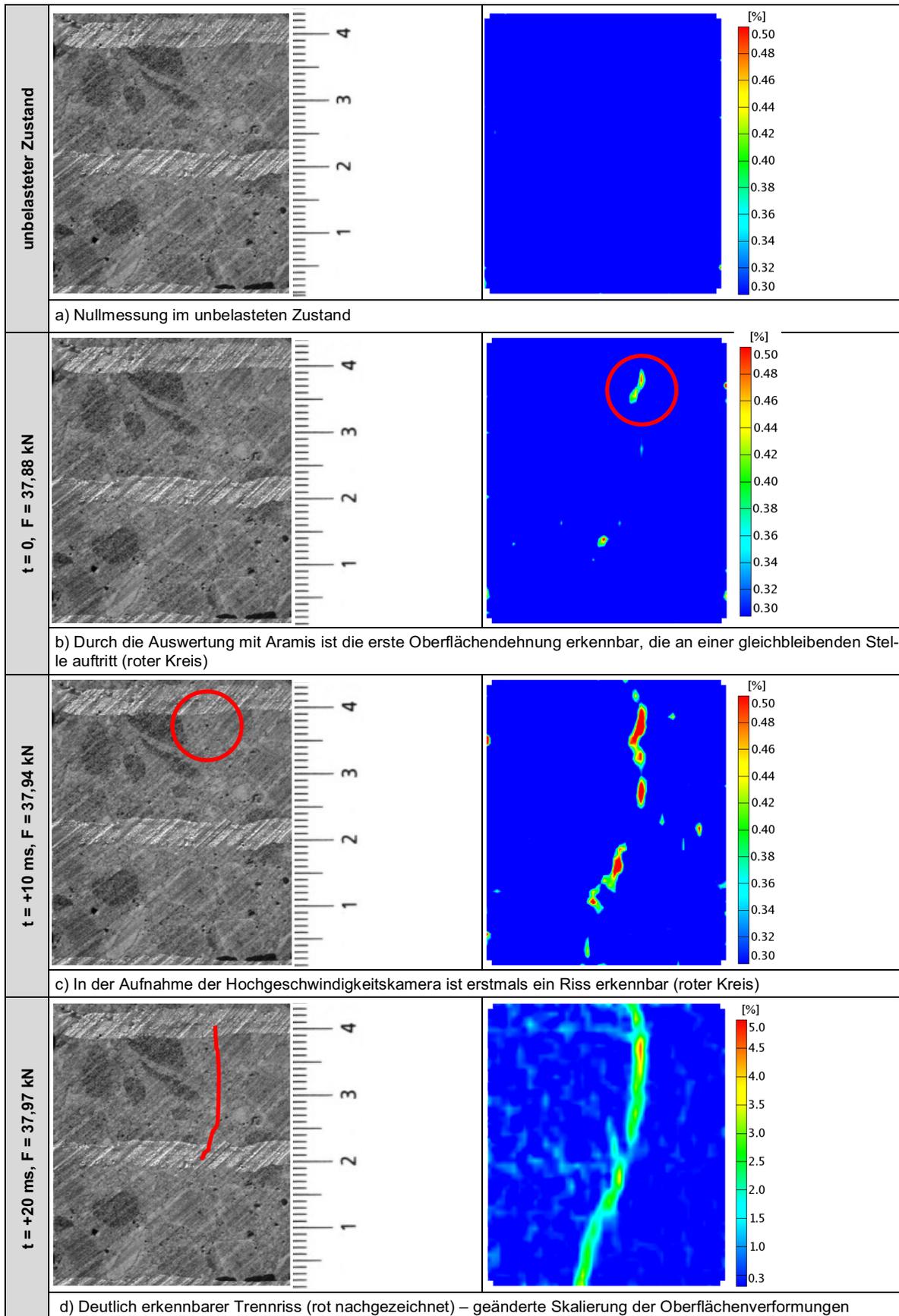


Abbildung 51: Probekörper mit mäanderförmig aufgetragenem Silberleitlack zur Auslösung der Hochgeschwindigkeitskamera und zugehörigem Bildausschnitt [FROST 2012]

### 10.2.3 Photogrammetrische Verformungsanalyse

Die Ergebnisse der mit dem Messsystem der Firma GOM durchgeführten photogrammetrischen Verformungsanalyse lieferten aufschlussreiche Erkenntnisse zum Einfluss unterschiedlicher Lasteinleitungsarten und werden daher im Abschnitt 10.3 näher erläutert.



**Abbildung 52:** Ergebnisse der durch die Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Shimadzu aufgezeichneten Bildsequenz (zentrische Positionierung des Messfeldes auf der Stirnseite der Probe, Bildfrequenz 1 kHz) [FROST 2012]

An dieser Stelle sollen zunächst die Ergebnisse der an den Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera vorgenommenen photogrammetrischen Verformungsanalyse diskutiert werden.

Abbildung 52 stellt die Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse der durch die Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichneten Bildfolge des mittleren Probenbereichs für vier unterschiedliche Belastungszustände dar. Dabei wird in Abbildung 52 auf der linken Seite das durch die Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnete Bild der zugehörigen Darstellung der vektoriellen Oberflächenverschiebungen auf der rechten Seite gegenübergestellt. Aufgrund der fehlenden Kalibrierung des Messbereichs können nur relative Verformungen in Prozent zur Nullmessung angegeben werden.

Abbildung 52a zeigt die unter einer Vorlast von 2 kN durchgeführte Nullmessung, die für die weitere Auswertung als Bezugsgröße für die Darstellung der relativen Verschiebungen dient. In Abbildung 52b sind erstmalig Oberflächenverformungen mit gleichbleibender Lage erkennbar. Das zugehörige Bild der Hochgeschwindigkeitskamera zeigt jedoch keinerlei Veränderungen, die auf eine beginnende Rissbildung schließen lassen. Zur erkennbaren Rissbildung kommt es erst 10 ms nach der durch Aramis detektierten Oberflächenverformung (siehe Abbildung 52c). Diese geht einher mit weiteren erkennbaren Verformungen im Bereich des später auftretenden Trennrisses. Ein deutlich erkennbarer Trennriss ist aber erst nach weiteren 10 ms im Originalbild erkennbar (siehe Abbildung 52d). Zur besseren Darstellung der zugehörigen vektoriellen Oberflächenverschiebungen musste die Skalierung der entsprechenden Darstellung in Abbildung 52d angepasst werden.

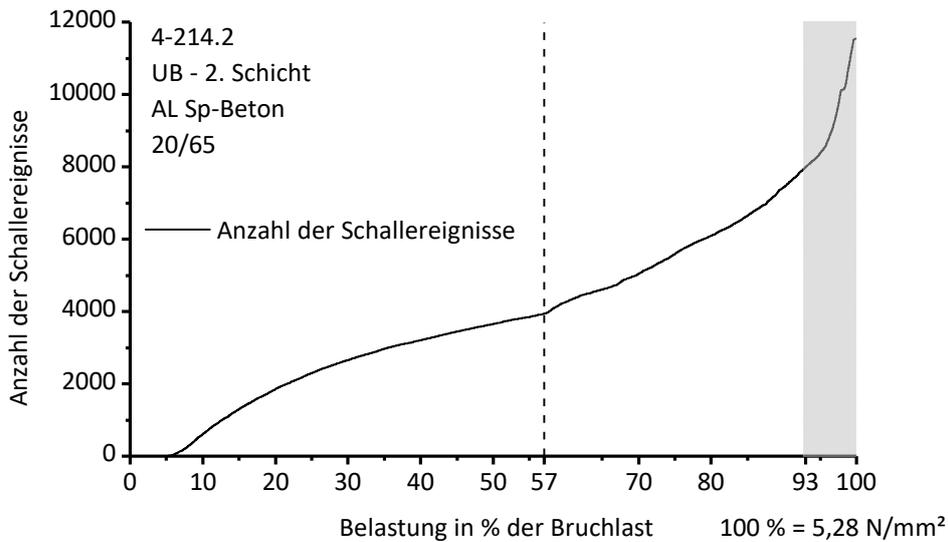
Durch die von [FROST 2012] vorgenommene Verformungsanalyse der Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera kann ein auftretender Riss früher als durch die visuelle Betrachtung lokalisiert werden. Auch der Rissfortschritt an der Oberfläche des Probekörpers kann abgebildet werden. Zur besseren Analyse des Bruchprozesses empfiehlt [FROST 2012] eine Kalibrierung des Systems von Aramis hinsichtlich der Zugbruch-Dehnung damit

bei der Auswertung der Verformungsanalyse zwischen großen Dehnungen und Rissen unterschieden werden kann.

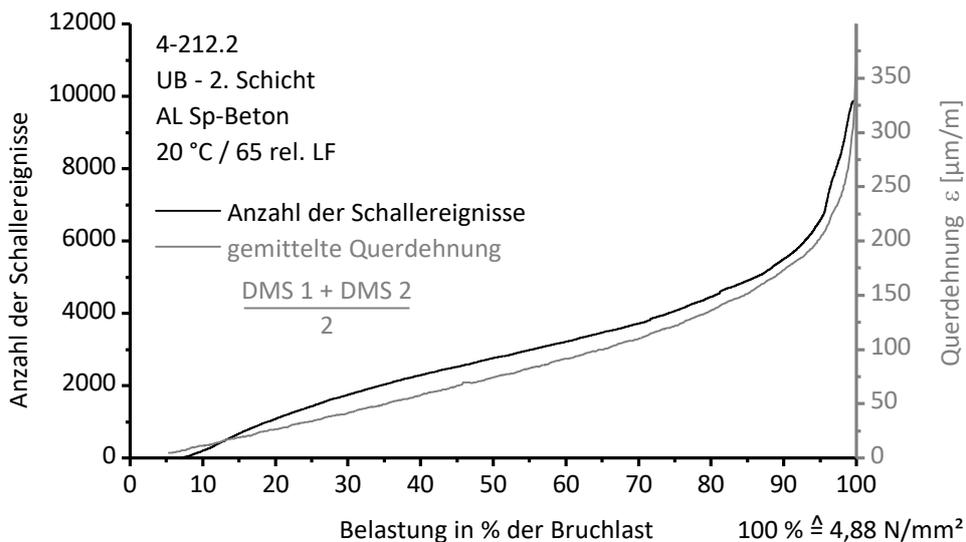
#### 10.2.4 Schallemissionsaktivität

Nachfolgend sollen die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse beispielhaft am Probekörper 4-214.2 diskutiert werden. Abbildung 53 zeigt die Anzahl der kumulierten Schallereignisse über den prozentualen Belastungsverlauf. Durch die anfängliche Belastung kommt es zu einem Setzen der Probe auf dem Hartfilzstreifen und zur Ausbildung von Reibungseffekten, die sich im Anstieg der Kurve zu Beginn des Versuchs widerspiegeln. Nach diesem beginnenden Anstieg verläuft die Kurve über einen längeren Zeitraum annähernd linear, was durch das gleichmäßige Auftreten von Schallereignissen zurückzuführen ist. Kurz vor dem Erreichen der Höchstlast steigt die in Abbildung 53 dargestellte Kurve steil an. Diese Steigerung des Graphen wird durch eine überproportional ansteigende Anzahl von Schallereignissen hervorgerufen und wurde in Abbildung 53 zur besseren Verdeutlichung grau hinterlegt. Im betreffenden Fall umfasst der Bereich stark gesteigerter Schallemissionsaktivität den Bereich zwischen 93 % der Bruchlast und dem Versagen der Probe. Dieser Bereich wurde aufgrund seiner gesteigerten Schallemissionsaktivität auch für die in Abschnitt 10.2.5 diskutierte Ortungsanalyse verwendet. Der in einem kurzen Zeitraum auftretende überproportionale Anstieg der Schallemissionsereignisse zum Belastungsende verdeutlicht das spröde Materialversagen des Probekörpers unter Spaltzugbelastung ohne vorzeitige Versagensankündigung.

Die durch die Aufzeichnung der Schallereignisse nachweisbare fortschreitende Mikrorissbildung wird auch durch die in Abbildung 54 dargestellte gemittelte Querdehnung verdeutlicht. Die Gegenüberstellung der erfassten Schallereignisse mit der gemittelten Querdehnung des Probekörpers 4-212.2 zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen zunehmender Querdehnung und erhöhter Schallemissionsaktivität kurz vor dem Erreichen der Bruchlast.



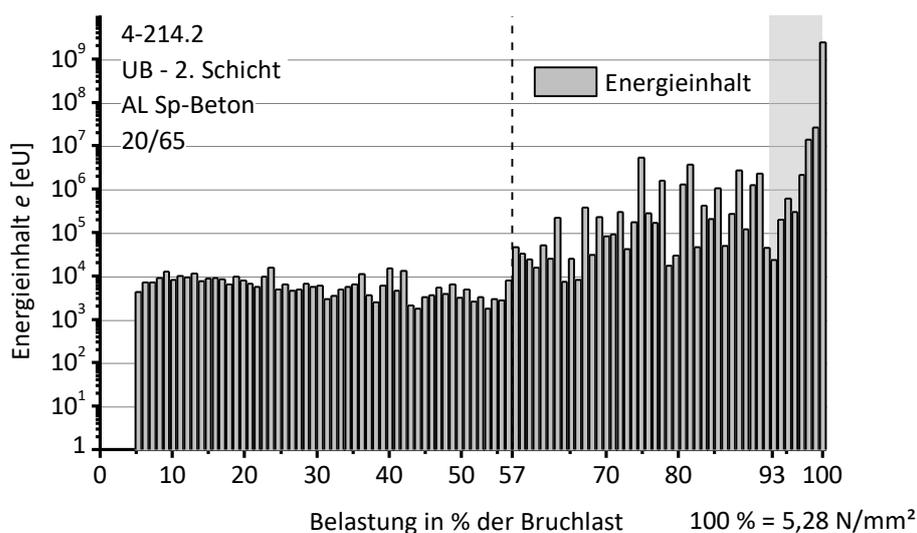
**Abbildung 53:** Anzahl der aufgezeichneten Schallereignisse über den Belastungsverlauf an Probekörper 4-214.2 [FROST 2012]



**Abbildung 54:** Qualitativer Zusammenhang der aufgezeichneten Schallereignisse und der gemittelten Querdehnung des Probekörpers 4-212.2 [FROST 2012]

Zur besseren Verdeutlichung der beim Spaltzugversuch auftretenden Versagensmechanismen sind in Abbildung 55 die Energieinhalte der während der Spaltzugprüfung aufgezeichneten Schallereignisse dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Energieinhalte der Schallereignisse bis zu halber Bruchlast nahezu konstant sind und lediglich mit einer geringfügigen Abnahme zu rechnen ist. Ab einer Bruchlast von circa 57 % kommt es zu

einem starken Anstieg der Energieinhalte und damit der während der Gefügeverschiebungen freigesetzten potenziellen Energie. Ebenfalls wurde in Abbildung 55 der Bereich zwischen 93 % der Bruchlast und dem Versagen der Probe markiert. Ein überproportionaler Anstieg der Energieinhalte kurz vor dem Bruch ist auch hier erkennbar und verdeutlicht abermals das spröde Versagen der Spaltzugprobe.



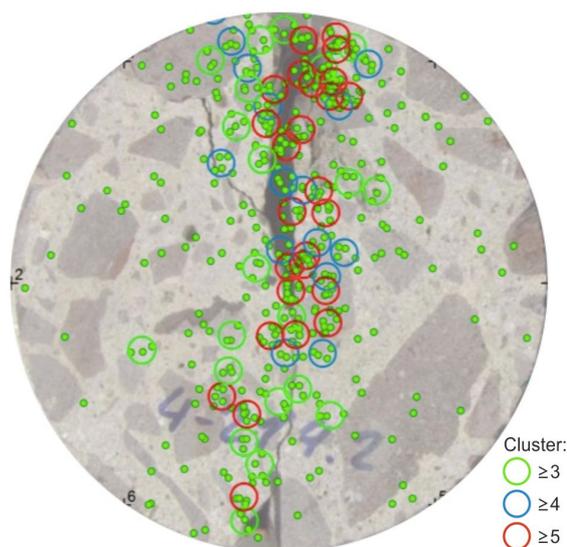
**Abbildung 55:** Energieinhalte der Schallereignisse des Probekörpers 4-214.2 über den prozentualen Belastungsverlauf [FROST 2012]

### 10.2.5 Lokalisierung der Schallereignisse

Die Analyse des Rissverlaufs im Probekörper wurde durch eine Lokalisierung der Schallereignisse ergänzt. Hierzu wurden die Daten der registrierten Schallereignisse durch einen Ortungsalgorithmus bearbeitet. Zur Erhöhung der Genauigkeit des Verfahrens wurden durch einen in der Analysesoftware integrierten Filterprozess (LUCY – location uncertainty) geortete Schallereignisse mit einer Ortsungengenauigkeit größer als 2 mm nicht berücksichtigt. In Abbildung 56 sind die lokalisierten Schallereignisse und das Bruchbild des Probekörpers 4-214.2 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse wurden Schallereignisse mit einer hohen räumlichen Punktedichte in sogenannten Clustern zusammengefasst.

Der Rissverlauf durch den Probekörper kann durch die georteten Schallereignisse sehr gut rekonstruiert werden. In Abbildung 56 ist eine eindeutige Konzentration der Schallereignisse im Bereich des ausgebildeten Risses erkennbar. Die Konzentration der Schallereignisse im Bereich der oberen Lasteinleitung zeigt einen für diesen Versagensmechanismus typischen Fall. Beim Versagen der Probe kam es in dieser Zone zu einem keilförmigen Ausbruch unter Ausbildung zweier aufeinander zulaufender Rissufer, die in einer erhöhten Anzahl von Schallereignissen resultieren. Im Gegensatz dazu können Schallereignisse, die im Bereich des Probenrandes lokalisiert wurden, nicht direkt der Rissbildung infolge der aufgetragenen Spaltzugbelastung zugeordnet werden. Es handelt sich hierbei vermehrt um Randreflexionen sowie durch andere Störfaktoren beeinflusste Ereignisse [Finck 2005].

Dieser Fakt wird auch durch eine von [FROST 2012] durchgeführte Analyse der Energieinhalte der Schallereignisse bestätigt. Hierzu wurden die während einer Laststeigerung von 0,5 kN auftretenden Schallereignisse entsprechend ihres Energieinhaltes differenziert. Die Analyse der Energieinhalte erfolgte dabei für sechs Laststufen vor Erreichen der Bruchlast. Hierbei stellte sich heraus, dass Schallereignisse mit großen Energieinhalten vorwiegend im Bereich des Risses lokalisiert wurden und Ereignisse in randnahen Bereichen geringere Energieinhalte aufweisen.



**Abbildung 56:** Lokalisierte Schallereignisse des Probekörpers 4-214.2 mit Darstellung der Ortungshäufigkeit (Clusterung) [FROST 2012]

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Lokalisierung der detektierten Schallereignisse eine gute Rekonstruktion des auftretenden Rissbildes erlaubt. Die örtliche Auflösung der SEA sowie die

erzielbare Genauigkeit bei der Lokalisierung der Schallereignisse ermöglichen eine gute Beschreibung des Rissverlaufs. Informationen zur Rissinitiation oder dem Risswachstum konnten allerdings mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht gewonnen werden. Hierzu ist eine höhere zeitliche Auflösung der SEA in Verbindung mit einer indirekten Wegsteuerung mit konstantem Risswachstum notwendig. Ein entsprechender Versuchsaufbau zur Durchführung von Spaltzugversuchen mit konstantem Risswachstum ist durch [Finck 2005] beschrieben.

### 10.2.6 Auswertung der Ultraschalllaufzeiten

Für die Untersuchungen zur Änderung der Ultraschalllaufzeiten während der Spaltzugprüfung wurden im Rahmen der Bachelorarbeit durch [FROST 2012] lediglich Tastversuche an Proben des Prüfloses 7 durchgeführt. Ziel dieser Versuche war die Definition eines weiteren Schädigungsindikators neben der Analyse der Schallemissionereignisse. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Versuche werden nachfolgend erläutert.

Wie bereits in Abschnitt 10.1.7 beschrieben, wurden für die Analyse der Ultraschalllaufzeiten zwei verschiedene Messsysteme (AMSY-5, USPC 3041) mit unterschiedlichen Lastkurven verwendet. In Abbildung 57 ist exemplarisch die mit dem Messsystem AMSY-5 gemessene Ultraschalllaufzeit dargestellt. Es ist hierbei erkennbar, dass bei den untersuchten Probekörpern unter zunehmender Belastung keine innere Gefügeschädigung über einen Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit diagnostiziert werden kann. Bei dem verwendeten Messsystem AMSY-5 und dem gewählten Versuchsablauf mit schrittweiser Belastung bleibt die Ultraschalllaufzeit während des Versuchs annähernd konstant. Eine deutlich erkennbare Veränderung der Ultraschalllaufzeit ist aufgrund der fehlenden Empfindlichkeit des Messsystems nicht nachzuweisen. Aus diesem Grund wurden von [FROST 2012] Versuche mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit und einer kontinuierlichen Bestimmung der Ultraschalllaufzeit unter Verwendung einer Abtastfrequenz von 6,67 bzw. 10 Hz durchgeführt.

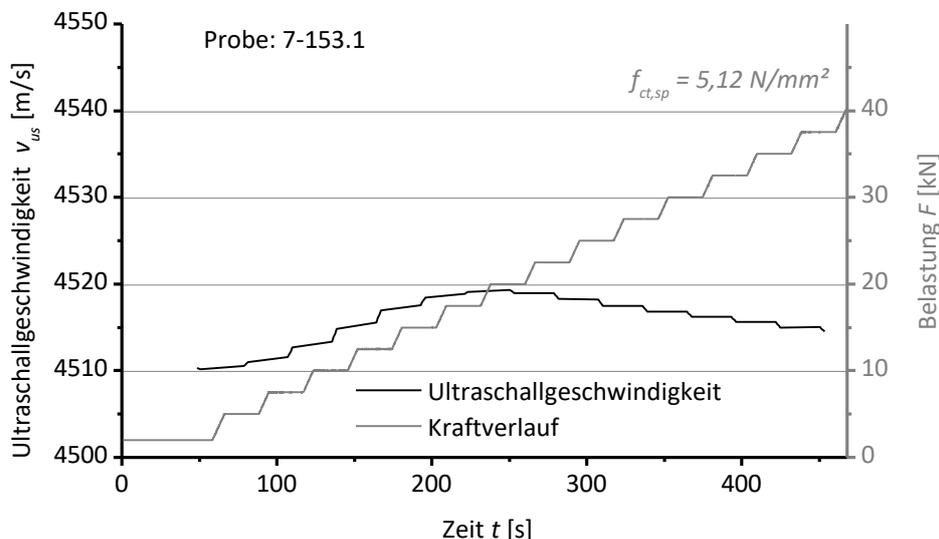


Abbildung 57: Ultraschallgeschwindigkeit und Kraftverlauf während des Spaltzugversuchs am Probekörper 7-153.1 [FROST 2012]

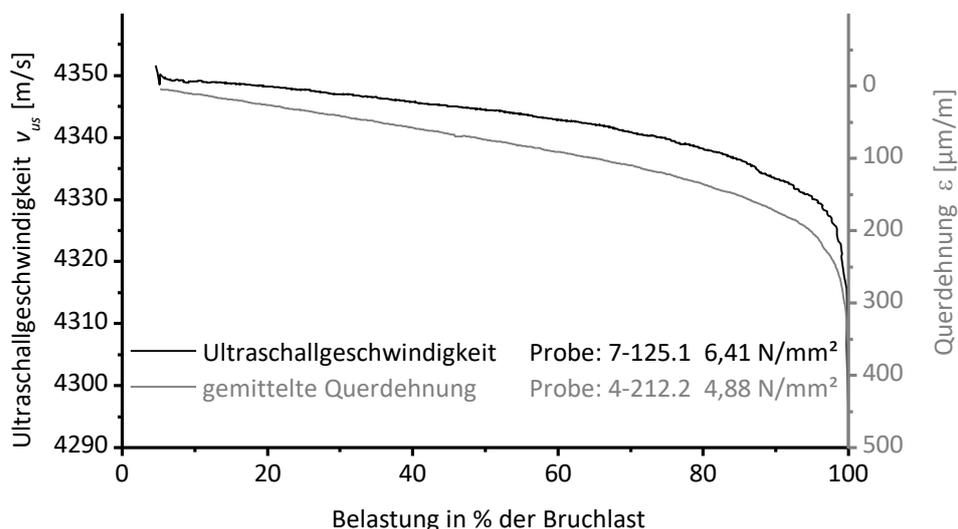
Abbildung 58 zeigt am Beispiel des Probekörpers 7-125.1 die Ergebnisse der Ultraschalllaufzeit. Der Versuch wurde mit einer Abtastrate von 6,67 Hz zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit durchgeführt. Aus Abbildung 58 ist ersichtlich, dass der Abfall der Ultraschalllaufzeit mit dem Messsystem USPC 3041 deutlich besser erfasst werden kann als dies mit dem Messsystem AMSY-5 möglich war. Es zeigt sich hier ein deutlicher Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit kurz vor dem Erreichen

der Bruchlast. Der starke Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit kurz vor dem Erreichen der Bruchlast stimmt mit der ebenfalls in Abbildung 58 dargestellten gemittelten Querdehnung des Probekörpers 4-212.2. Aus versuchstechnischen Gründen war eine gemeinsame Bestimmung der Querdehnung und der Ultraschalllaufzeiten an einem Probekörper nicht möglich. Die in Abbildung 58 dargestellte gemittelte Querdehnung des Probekörpers 4-212.2 ist der aus zwei auf der Vorder- und Rück-

seite applizierten Dehnmessstreifen gemittelte Wert.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die durch die Querdehnung hervorgerufene Vergrößerung der Durchschallungslänge nicht der

Verlängerung der Ultraschalllaufzeit entspricht, sondern durch die vor dem Erreichen der Bruchlast eintretende Mikrorissbildung und der damit einhergehenden Gefügeveränderungen hervorgerufen wird.



**Abbildung 58:** Vergleichende Darstellung der Ultraschallgeschwindigkeit des Probekörpers 7-125.1 und der gemittelten Querdehnung des Probekörpers 4-212.2 der an der Vorder- und Rückseite befestigten Dehnmessstreifen [FROST 2012]

Laut [FROST 2012] lassen sich mit dem verwendeten Messsystem USPC 3041 deutliche Veränderungen der Ultraschalllaufzeit kurz vor dem Erreichen der Bruchlast nachweisen, die ein Indikator für das spröde Materialversagen sind. Dieser Abfall der Ultraschalllaufzeit kann jedoch nicht eindeutig als Schädigungsindikator verwendet werden, da sich der gemittelte Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit im Bereich  $< 50$  m/s bewegt. Dieser Sachverhalt wird ebenso durch die von [FROST 2012] durchgeführte Amplitudenauswertung gestützt.

### 10.3 Einfluss der Lasteinleitung

Die Untersuchungen von [FROST 2012] zum Einfluss der Lasteinleitung umfassen Versuche zur Art der Lasteinleitung (Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006] bzw. DIN-EN 12390-6:2001), des Einflusses der Breite des Lasteinleitungstreifens sowie Versuche zum Einfluss einer außermittigen Lasteinleitung. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Versuchsserien werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

#### 10.3.1 Art der Lasteinleitung

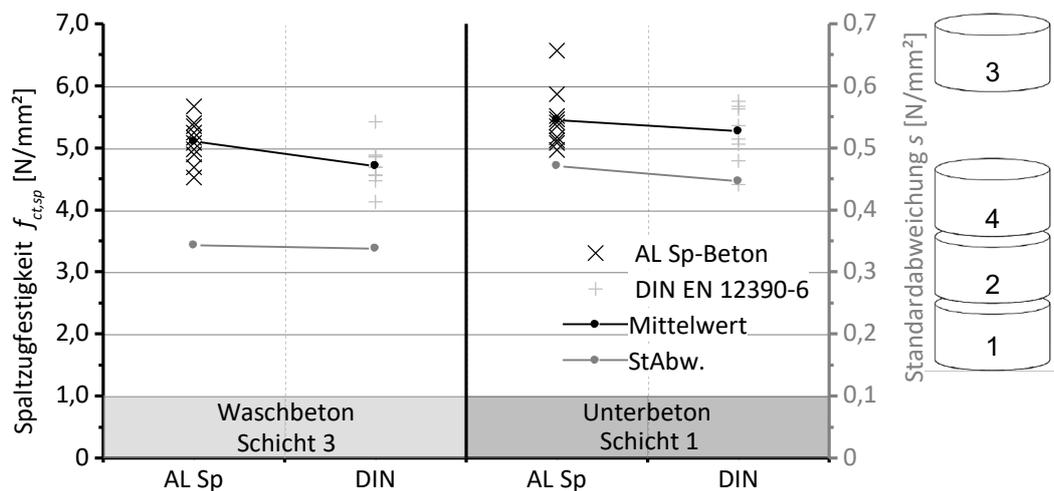
Zur Untersuchung des Einflusses der Art der Lasteinleitung wurden durch [FROST 2012] an Probekörpern des Prüfloses 4 Untersuchungen entsprechend der Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006] und der DIN-EN 12390-6:2001 durchgeführt. Dabei fordert die AL Sp-Beton [ALSP 2006] als Lasteinleitungstreifen Hartfilzstreifen der Härte F5 oder H1 nach DIN 61200 sowie eine konkav ausgebildete Lasteinleitungsschiene. Im Gegensatz dazu erfolgt die Lasteinleitung nach DIN-EN 12390-6:2010 über Zwischenstreifen aus Hartfaserplatten nach EN 316 mit einer Dichte  $\geq 900$  kg/m<sup>3</sup> und planen Lasteinleitungsschienen. Weitere Informationen zu den einzelnen Prüfverfahren sind der Tabelle 1 des Abschnitts 2.2 zu entnehmen. Durch [FROST 2012] wurden sowohl Untersuchungen am Wasch- als auch am Unterbeton des Prüfloses 4 durchgeführt (siehe Tabelle 23).

**Tabelle 23:** Parameter zur Bestimmung des Einflusses der Art der Lasteinleitung [FROST 2012]

Serie	BAB	Lasteinleitung nach	Schicht im BK	Betonsorte	Feuchtezustand
4-yyy.3	A11	AL Sp-Beton	3. Schicht	Waschbeton	20 °C / 65 % rel. LF
4-yyy.3		DIN-EN 12390-6	3. Schicht		
4-yyy.1		AL Sp-Beton	1. Schicht	Unterbeton	
4-yyy.2		AL Sp-Beton	2. Schicht		
4-yyy.3		DIN-EN 12390-6	1. Schicht		

Vergleicht man die in Abbildung 59 dargestellten Ergebnisse, kann man feststellen, dass sowohl die Spaltzugfestigkeiten als auch die Standardabweichungen im Waschbeton geringer sind als im Unterbeton. Laut [FROST 2012] werden bei einer Lasteinleitung nach DIN-EN 12390-6:2001 geringere Spaltzugfestigkeiten innerhalb einer Betonsorte erreicht als bei der Prüfung nach AL Sp-Beton [ALSP 2006]. Dabei unterscheiden sich die Stan-

dardabweichungen der an den Waschbetonen vorgenommenen Untersuchungen nur geringfügig voneinander, während beim Unterbeton die nach DIN-EN 12390-6:2001 geprüfte Serie eine geringere Standardabweichung aufweist als bei den Serien der AL Sp-Beton [ALSP 2006]. Bei den Untersuchungen von [FROST 2012] zeigte sich bei den beiden Schichten des Unterbetons kein Unterschied bei der Spaltzugfestigkeit.

**Abbildung 59:** Vergleich des Einflusses der Lasteinleitungsart auf die Spaltzugfestigkeit [FROST 2012]

Die geringere Spaltzugfestigkeit des Waschbetons ist auf das kleinere Größtkorn und den höheren Luftporengehalt zurückzuführen. Des Weiteren weist der Waschbeton aufgrund seines kleineren Größtkorns ein homogeneres Gefüge auf, was in geringeren Prüfstreuungen resultiert. Entsprechend der Aussagen von [FROST 2012] kennzeichnen die geringeren Spaltzugfestigkeiten der nach DIN-EN 12390-6:2001 geprüften Probekörpern ein Zugversagen, welches auch den theoretischen Ansätzen von [WEINGART 1970] und [WRIGHT 1955] entspricht. Ebenso konnte durch die Untersuchungen von [FROST 2012] die von [BONZEL 1964] beschriebene größere Prüfstreuung bei der Verwendung von Hartfilz (Forderung der AL Sp-Beton [ALSP 2006]) für den Fall des Unterbetons bestätigt werden.

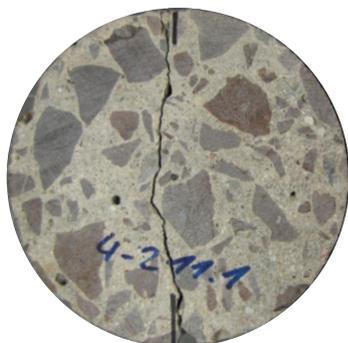
Das zuvor beschriebene Zugversagen der nach DIN-EN 12390-6:2001 geprüften Probekörper wird auch durch die in Abbildung 60 dargestellten Bruchbilder verdeutlicht. In Abbildung 60b ist eine typische Verästelung (Y-Bruch) der Bruchebene im Bereich der oberen Lasteinleitung des nach AL Sp-Beton [ALSP 2006] geprüften Probekörpers erkennbar. Dieses Bruchbild weist der in Abbildung 60a dargestellte und nach DIN-EN 12390-6:2001 geprüfte Probekörper nicht auf. Der in Abbildung 60b erkennbare Y-Bruch weist auf ein Versagen hin, das nicht allein von Zugspannungen bestimmt wird. Es handelt sich hierbei um Schubbrüche wie sie auch durch [MITCHELL 1961] beschrieben wurden. Bei den von [FROST 2012] durchgeführten Spaltzugversuchen zum Einfluss der Lasteinleitungsart kam es im Unter- und Waschbeton der nach AL Sp-Beton [ALSP 2006] geprüften Probekörpern vermehrt zu Schubbrüchen.

Die Ausbildung von Schubbrüchen im Bereich der oberen Lasteinleitung kann auch durch die Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse bestätigt werden. In der Abbildung 61 und Abbildung 62 sind für den Unter- bzw. Waschbeton die mittels photogrammetrischer Verformungsanalyse ermittelten Querdehnungen der nach AL Sp-Beton [ALSP 2006] bzw. DIN-EN 12390-6:2001 geprüfte Probekörper gegenüber gestellt. Hierbei zeigt sich laut [FROST 2012], dass es, unabhängig von der Betonsorte, bei Prüfungen nach DIN-EN 12390-6:2001 unmittelbar vor dem Bruch zur Ausbildung von größeren und auf den Bereich der späteren Bruchebene konzentrierten Querdehnungen kommt. Dieser Sachverhalt wird auch durch die

von [FROST 2012] horizontal durch den Probekörper gelegten Höhenprofile bestätigt, die eine Dehnungskonzentration im Bereich der späteren Bruchebene bei nach DIN-EN 12390-6:2001 geprüften Probekörpern aufzeigen. Im Gegensatz dazu weisen die nach AL Sp-Beton [ALSP 2006] geprüften Probekörper geringere und breiter verteilte Querdehnungen im Bereich der oberen Lasteinleitung auf, die ein Indiz für das zuvor diskutierte Schubversagen sind. Somit bestätigen die in Abbildung 61 und Abbildung 62 veranschaulichten Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse die in Abbildung 60b dargestellten Bruchbilder.

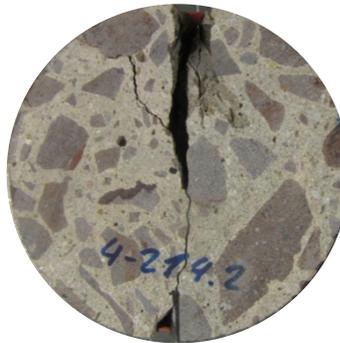
**a) Lasteinleitung nach DIN-EN 12390-6**

Probekörper 4-211.1; Unterbeton - 1. Schicht



**b) Lasteinleitung nach AL Sp-Beton [ALSP 2006]**

Probekörper 4-214.2; Unterbeton - 2. Schicht



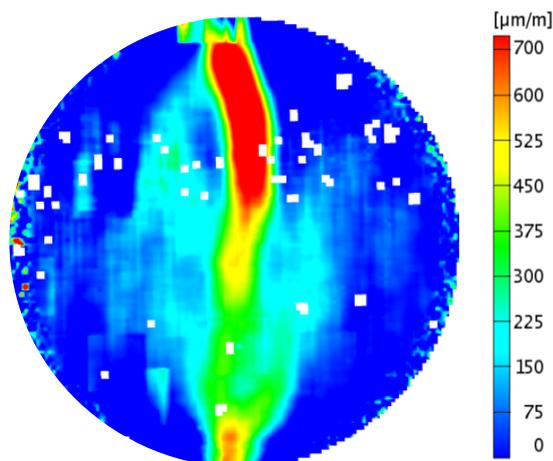
**Abbildung 60:** Vergleich der charakteristischen Bruchbilder bei unterschiedlichen Lasteinleitungsarten [FROST 2012]

**a) Lasteinleitung nach DIN-EN 12390-6**

4-215.1 – Unterbeton

$f_{ct,sp} = 5,75 \text{ N/mm}^2$  mit 44,66 kN

Bild bei 43,28 kN  $\pm 96,9 \%$  der Bruchlast

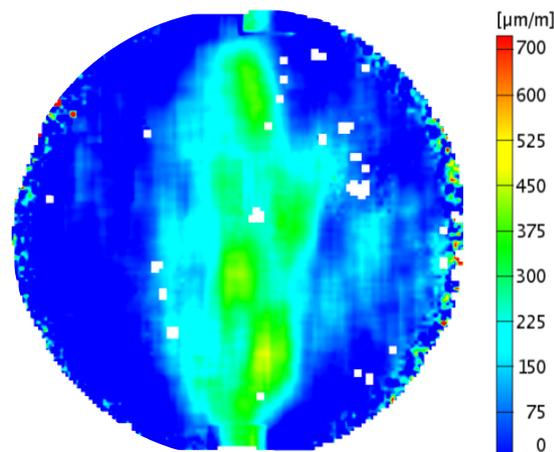


**b) Lasteinleitung nach AL Sp-Beton [ALSP 2006]**

4-222.2 – Unterbeton

$f_{ct,sp} = 5,37 \text{ N/mm}^2$  mit 41,99 kN

Bild bei 40,49 kN  $\pm 96,4 \%$  der Bruchlast



**Abbildung 61:** Gegenüberstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse bei unterschiedlichen Lasteinleitungsarten [FROST 2012]

**a) Lasteinleitung nach DIN-EN 12390-6**

4-209.3 – Waschbeton

$f_{ct,sp} = 4,86 \text{ N/mm}^2$  mit 37,89 kN

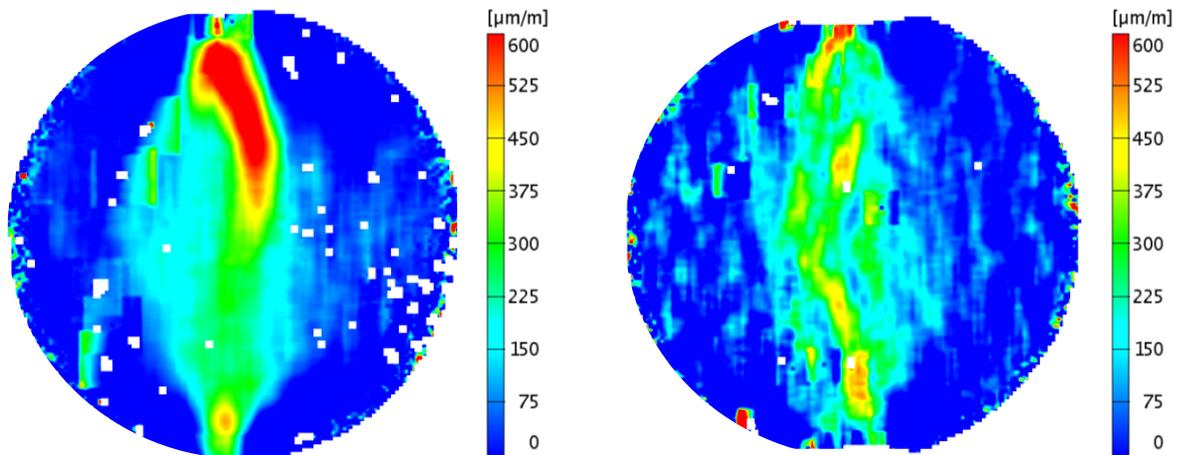
Bild bei 36,69 kN  $\pm 96,8 \%$  der Bruchlast

**b) Lasteinleitung nach AL Sp-Beton [ALSP 2006]**

4-224.3 – Waschbeton

$f_{ct,sp} = 5,34 \text{ N/mm}^2$  mit 41,63 kN

Bild bei 40,63 kN  $\pm 97,6 \%$  der Bruchlast



**Abbildung 62:** Gegenüberstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse bei unterschiedlichen Lasteinleitungsarten [FROST 2012]

### 10.3.2 Breite des Lasteinleitungsstreifens

Zur Untersuchung des Einflusses der Breite des Lasteinleitungsstreifens wurden durch [FROST 2012] Hartfaserstreifen mit den in Tabelle 24 aufgelisteten Breiten verwendet. Die Spaltzugprüfung wurde nach DIN-EN 12390-6:2001 (gerade Lasteinleitungsschienen) durchgeführt.

Die in Abbildung 63 für den Unterbeton dargestellten Ergebnisse zeigen für die Serie mit 5 mm brei-

ten Hartfaserstreifen, bei gleicher Standardabweichung, einen Abfall der Spaltzugfestigkeit von 15,4 %. Der bei geringeren Breiten der Lasteinleitungsstreifen sichtbare Festigkeitsabfall wird durch [FROST 2012] durch größere, im Probekörper bei gleicher Belastung resultierende Zugspannungen erklärt. Diese experimentellen Ergebnisse werden auch durch die theoretischen Überlegungen von [MITCHELL 1961] und [WEINGART 1970] bestätigt.

**Tabelle 24:** Parameter zur Bestimmung des Einflusses der Breite des Lasteinleitungsstreifens [FROST 2012]

Nr.	BAB	Lasteinleitung nach	Schicht im BK	Betonsorte	Feuchtezustand
PL 4	A11	DIN-EN 12390-6 <b>10 mm</b>	1. Schicht	Unterbeton	20 °C / 65 % rel. LF
		DIN-EN 12390-6 <b>5 mm</b>	4. Schicht		
		DIN-EN 12390-6 <b>10 mm</b>	3. Schicht	Waschbeton	20 °C / 65 % rel. LF
		DIN-EN 12390-6 <b>5 mm</b>	3. Schicht		

In Abbildung 64 sind die für unterschiedliche Lasteinleitungsbreiten ermittelten Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse gegenübergestellt. Die in Abbildung 64b dargestellte Verteilung der Querdehnungen unterstützt nicht die von [WEINGART 1970] aufgestellte Spannungstheorie, dass bei geringer werdender Breite des Lasteinleitungsstreifens die Querdehnungen größer werden und einen kleineren horizontalen Bereich erfassen. In beiden Fällen wurden für die Probekörper identische maximale Querdehnungen ermittelt. Betrachtet man die maximalen Querdehnungen unter Berücksichtigung der maximalen Bruchlast, so wird jedoch die in Abbildung 63 für den Unterbeton erkennbare Abnahme der Spaltzugfestigkeit bei geringer werdender Breite des Lasteinleitungsstreifens bestätigt, da die maximalen Querdehnung der in Abbildung 64b dargestell-

ten Dehnungsverteilung bei einer deutlich geringeren Bruchlast erreicht wird. Somit kann angenommen werden, dass es bei einer geringeren Belastung zur Ausbildung vergleichbarer Zugspannungen kommt, was in Übereinstimmung mit den in Abbildung 63 dargestellten Ergebnisse ist.

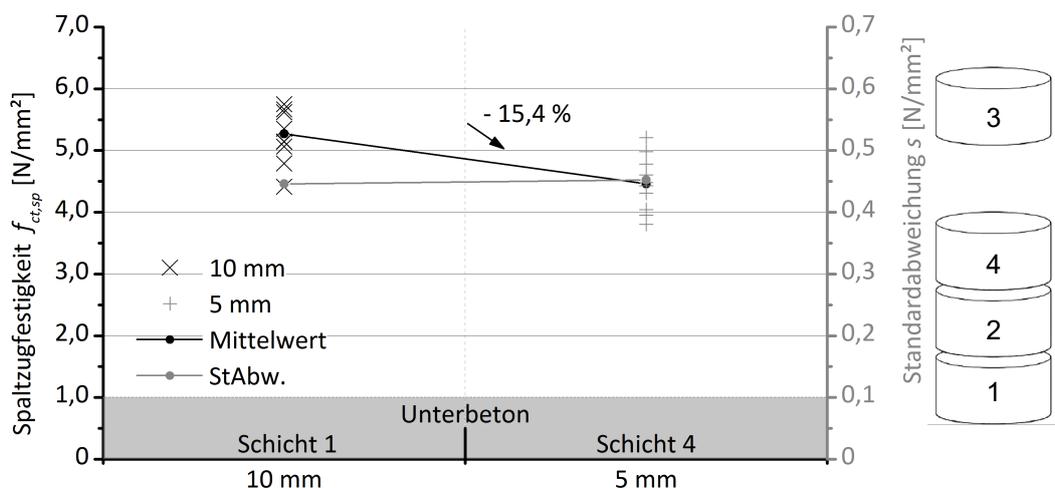


Abbildung 63: An der Vorder- und Rückseite des Probekörpers 4-221.1 gemessene Querdehnungen bei vorderer Einbaulage [FROST 2012]

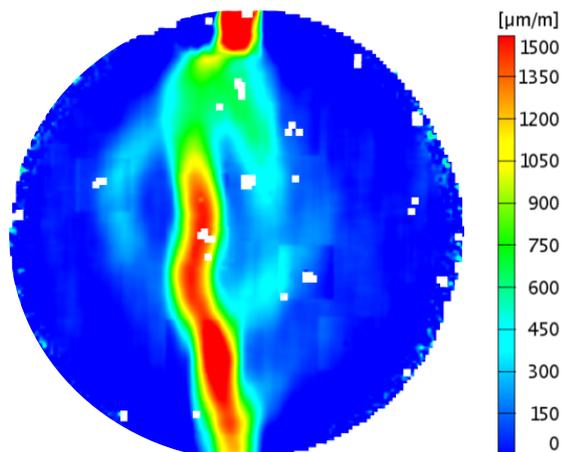
#### a) 10 mm breite Hartfaserstreifen

4-186.3 – Waschbeton

Lasteinleitung in Anlehnung an DIN EN 12390-6

$f_{ct,sp} = 4,91 \text{ N/mm}^2$  mit 38,24 kN

Bild bei 37,92 kN  $\pm 99,2 \%$  der Bruchlast



#### b) 5 mm breite Hartfaserstreifen (DIN EN 12390-6)

4-188.3 – Waschbeton

Lasteinleitung in Anlehnung an DIN EN 12390-6

$f_{ct,sp} = 4,99 \text{ N/mm}^2$  mit 34,99 kN

Bild bei 34,64 kN  $\pm 99,3 \%$  der Bruchlast

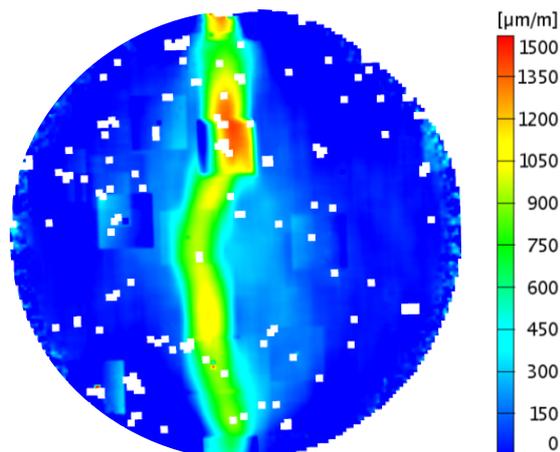
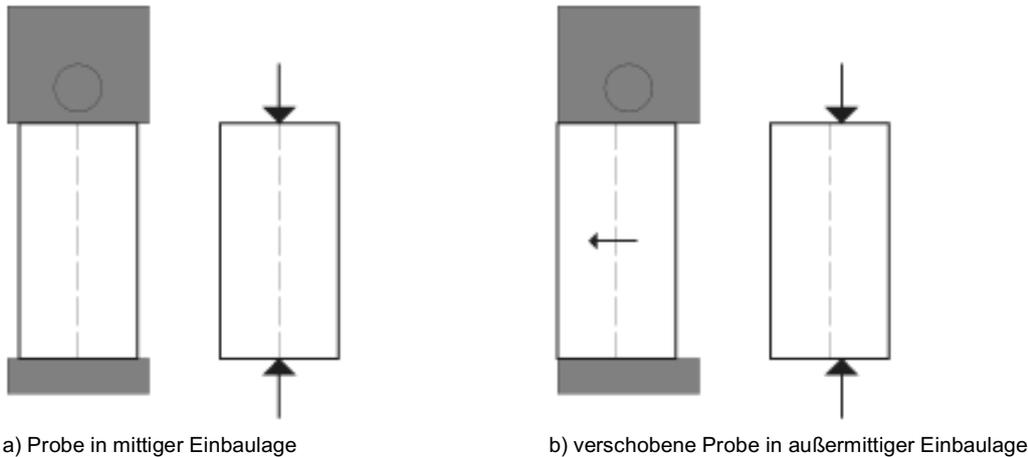


Abbildung 64: Gegenüberstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse bei unterschiedlichen Breiten des Lasteinleitungsstreifens [FROST 2012]

### 10.3.3 Außermittige Lasteinleitung

Im Rahmen der während des Ringversuchs und der begleitenden Untersuchungen durchgeführten Versuche zeigte sich, dass bei der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Prüfvorrichtung des Typs 1 eine Verschiebung des Probekörpers um jeweils

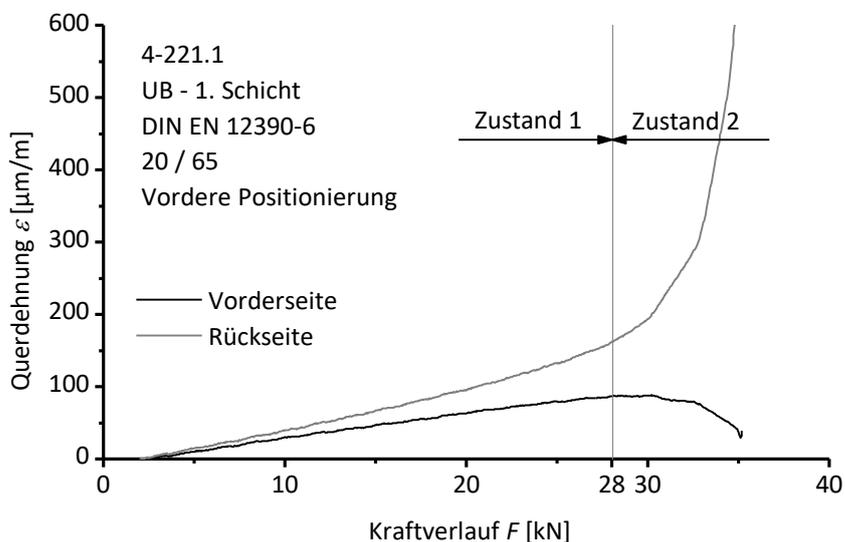
5 mm nach vorne bzw. hinten möglich ist (siehe Abbildung 65). Durch [FROST 2012] wurde der Einfluss einer solchen Außermittigkeit das Versagensbild des Probekörpers anhand Dehnungsmessungen sowie photogrammetrischer Verformungsanalysen untersucht.



**Abbildung 65:** Außermittiger Lasteintrag durch die Verschiebung des Probekörpers entlang der Lasteinleitungsschienen [FROST 2012]

In Abbildung 66 sind die an der Vorder- und Rückseite eines Probekörpers bei außermittiger Lasteinleitung gemessenen Querdehnungen über den Kraftverlauf aufgetragen. Der Probekörper wurde dabei um 5 mm aus der mittigen Position entlang der Lasteinleitungsschiene nach vorne verschoben. Hierbei zeigt sich, dass im Zustand 1 die Querdehnungen an der Vorder- und Rückseite bei steigender Belastung linear, jedoch mit unter-

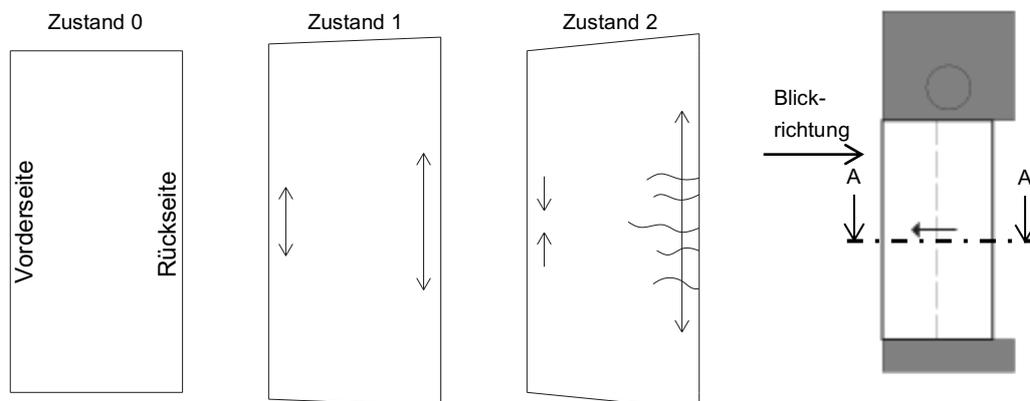
schiedlichem Anstieg, zunehmen. Im Zustand 2 steigt die auf der Rückseite gemessene Querdehnung überproportional an, während an der Vorderseite eine scheinbare Stauchung erkennbar ist. Kurz vor dem Bruch des Probekörpers hat sich die Querdehnung an der Vorderseite scheinbar nahezu dem Wert im belastungsfreien Zustand angenähert.



**Abbildung 66:** An der Vorder- und Rückseite des Probekörpers 4-221.1 gemessenen Querdehnungen bei vorderer Einbaulage [FROST 2012]

Auf Basis des in Abbildung 66 dargestellten Verlaufs der Querdehnungen bei außermittiger Lasteinleitung leitet [FROST 2012] den in Abbildung 67 dargestellten Bruchmechanismus ab. Entsprechend der Aussagen von [FROST 2012] kommt es während der anfänglichen Belastungsphase zu einer unterschiedlichen linearen Zunahme der Querverformungen (Zustand 1). Bei weiter

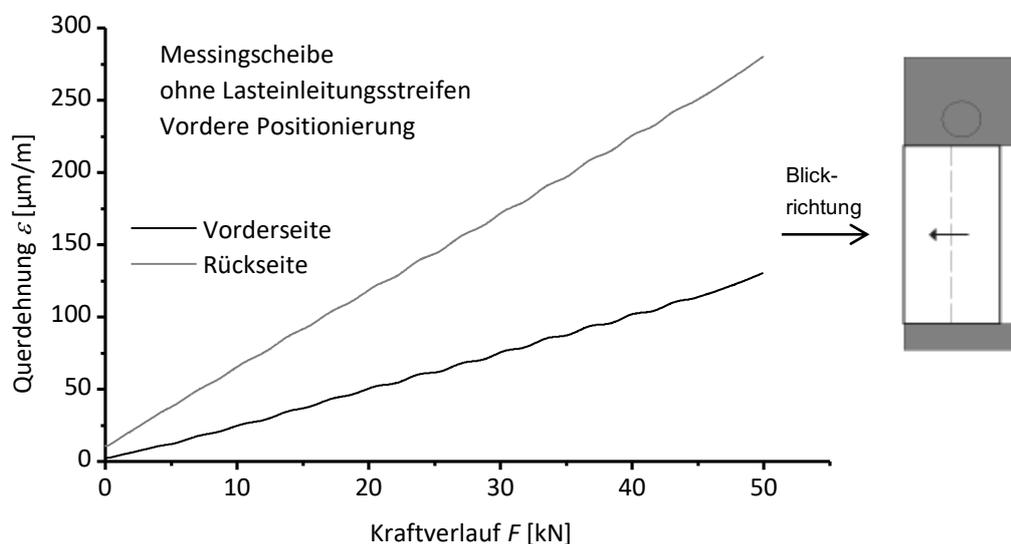
steigender Belastung entsteht durch die außermittige Lasteinleitung eine Spaltwirkung, die auf der Rückseite eine noch stärker anwachsende Verformung hervorruft während auf der Vorderseite die Dehnungen scheinbar zurückgehen (Zustand 2). Es ist dabei anzunehmen, dass das Versagen der Probe durch die auf der Rückseite einsetzende Mikrorissbildung initiiert wird.



**Abbildung 67:** Schematische Darstellung des Bruchmechanismus im Horizontalschnitt (A-A) bei außermittiger Lasteinleitung [FROST 2012]

Um die Ergebnisse und die daraus getroffenen Aussagen zu verifizieren, wurden durch [FROST 2012] die Auswirkungen der Verschiebungen an einer Messingscheibe simuliert. Die verwendete Messingscheibe hat die gleichen Abmessungen der in der AL Sp-Beton [ALSP 2006] beschriebenen Spaltzugproben. Die Belastung der Messingscheibe erfolgte bis zu einer Last von 50 kN ohne die Verwendung von Lasteinleitungstreifen aus Hartfilz.

In Abbildung 68 ist der Verlauf der an der Vorder- und Rückseite der Messingscheibe gemessenen Querdehnungen dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass es auch hier bei einer außermittigen Lasteinleitung zu einem unterschiedlich starken linearen Anstieg der Querdehnungen auf der Vorder- und Rückseite der Messingscheibe kommt und die im Zustand 1 an Betonproben gemessenen unterschiedlichen Querverformungen verifizieren lassen.



**Abbildung 68:** An einer Messingscheibe ermittelter Verlauf der Querdehnungen bei außermittiger Lasteinleitung [FROST 2012]

Der Einfluss der außermittigen Lasteinleitung auf das Versagen des Probekörpers unter Spaltzugbelastung wurde durch [FROST 2012] des Weiteren auch mittels photogrammetrischer Verformungsanalyse untersucht. Abbildung 69 zeigt die an Probekörpern aus Waschbeton ermittelten Oberflächenverformungen bei unterschiedlichen Einbau-

lagen. Die Erfassung der Oberflächenverformungen erfolgte durch das Messsystem Aramis mit einer Bildfrequenz von 1 Hz, wobei in Abbildung 69 nur das jeweils letzte Bild kurz vor dem Versagen des Probekörpers dargestellt ist. Abbildung 69a zeigt die Oberflächenverformung bei hinterer Einbaulage und Abbildung 69b bei vorderer Einbaulage.

ge. Aufgrund der ungleichen maximalen Oberflächenverformungen wurde der Skalierungsfaktor unterschiedlich gewählt. Auffällig ist jedoch die stärker ausgeprägte Dehnungskonzentration bei größeren absoluten Dehnungen in Abbildung 69a im Gegensatz zur eher flächigen Dehnungsverteilung in Abbildung 69b.

Die abschließende Bewertung der Untersuchungen zum Einfluss einer außermittigen Lasteinleitung zeigt sowohl die Auswirkung auf den Bruchmechanismus als auch die daraus resultierende Beeinflussung der Spaltzugfestigkeit. Es konnte

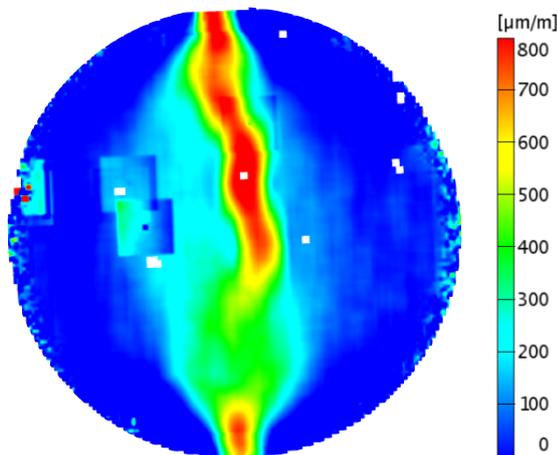
durch [FROST 2012] mit allen drei Verfahren gezeigt werden, dass es bei außermittigem Lasteintrag an der Vorder- und Rückseite zu ungleichen Verformungen kommt. Daraus wird ein asymmetrischer Bruchmechanismus abgeleitet, bei dem die Probe einseitig durch eine Spaltwirkung der Lasteinleitungsschiene versagt. Des Weiteren ist anzunehmen, dass ein außermittiger Lasteintrag zu geringeren Spaltzugfestigkeiten führt. Diese These stützt sich aber lediglich auf das asymmetrische Bruchverhalten und konnte im Zuge der Arbeit von [FROST 2012] nicht hinreichend belegt werden

#### a) Hintere Positionierung

4-184.3 – Waschbeton

$f_{ct,sp} = 4,71 \text{ N/mm}^2$  mit 36,74 kN

Bild bei 36,21 kN  $\approx 98,6 \%$  der Bruchlast



#### b) Vordere Positionierung

4-192.3 – Waschbeton

$f_{ct,sp} = 4,13 \text{ N/mm}^2$  mit 32,22 kN

Bild bei 31,67 kN  $\approx 98,3 \%$  der Bruchlast

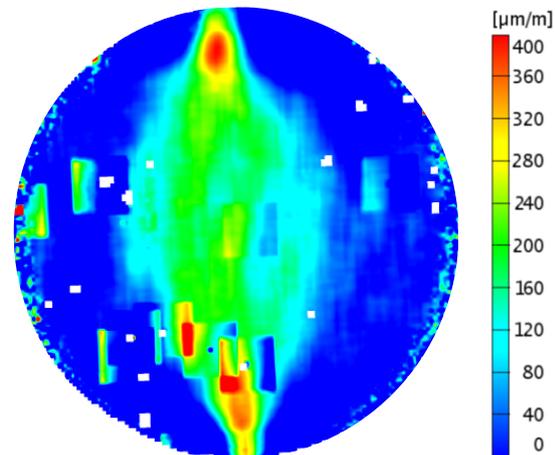


Abbildung 69: Gegenüberstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse bei extremalen Einbaulagen der Probekörper [FROST 2012]

## 10.4 Feuchteinfluss

Um den Einfluss der Lagerungsbedingungen zu untersuchen, wurden durch [FROST 2012] die Festigkeitsergebnisse der in Tabelle 25 dargestellten Prüfserien ausgewertet. Hierbei handelt es sich um von [FROST 2012] durchgeführte Versuche an Prüfserien der BAB A11 (Prüflos 4) und eigene Untersuchungen des Prüfloses 1 (Laborbeton) sowie Versuchen an Proben der BAB A14 mit einer einschichtigen Betondecke (keine Waschbetonschicht).

Die in Abbildung 70 dargestellten Spaltzugfestigkeiten zeigen, in Analogie zur Betondruckfestigkeit, eine deutlich erkennbare Abnahme der Spaltzugfestigkeit bei zunehmender Wassersättigung. Die von [FROST 2012] an Probekörpern des Prüfloses 4 bestimmten Spaltzugfestigkeiten weisen einen Festigkeitsabfall von 7,9 % der wassergesättigten Proben gegenüber bei Normklima (20 °C / 65 rel.

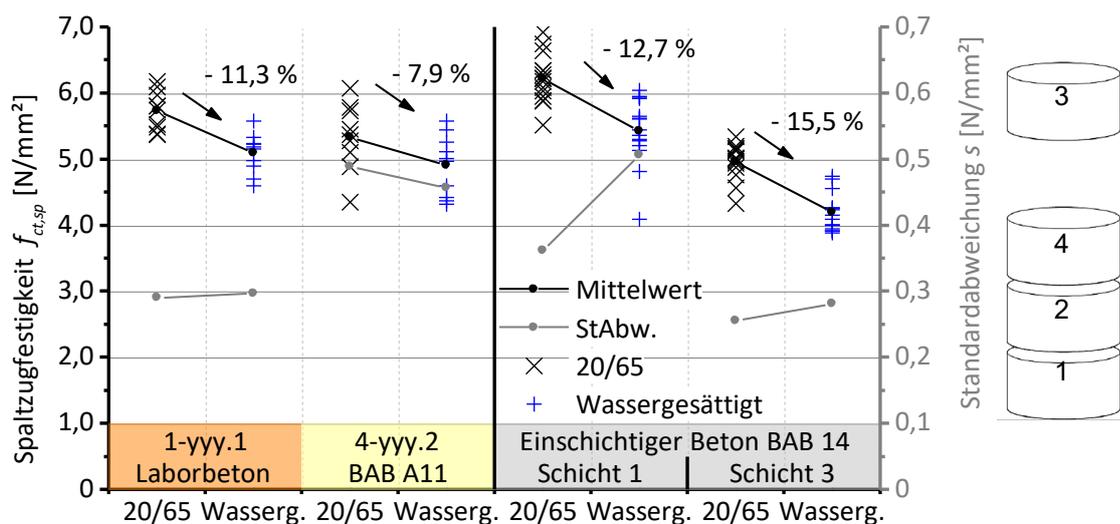
LF) gelagerten Proben auf. Die im Rahmen von eigenen Untersuchungen ermittelten Spaltzugfestigkeiten weisen mit 11,3 % (Laborbeton Prüflos 1); 12,7 % (Bestandsbeton BAB A14, untere Schicht) bzw. 15,5 % (Bestandsbeton BAB A14, obere Schicht) eine höhere Abnahme der Spaltzugfestigkeit im wassergesättigten Zustand auf. Auffällig ist hierbei der starke Festigkeitsunterschied zwischen oberer und unterer Spaltzugscheibe der einschichtigen Betonfahrbahnplatte der BAB A14. Die Ursache hierfür besteht in einer möglichen Vorschädigung des oberen Plattenbereichs aufgrund des Alters dieses Autobahnabschnittes (> 10 Jahre). Weiterhin zeigt sich, dass die Abnahme der Spaltzugfestigkeit mit dem Feuchtegehalt im wassergesättigten Zustand korreliert (siehe Tabelle 26). Die Streuung der Prüfergebnisse wurde, mit Ausnahme der Probekörper des Bestandsbetons der BAB A14 - untere Schicht, nicht durch die Wasserlagerung beeinflusst.

Die aufgrund der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ermittelten Spaltzugfestigkeiten zeigen deutliche Abweichungen, die bei einer von den Vorgaben der AL Sp-Beton [ALSP 2006] abweichenden Lagerung der Probekörper berücksichtigt werden müssen. Der nachgewiesene Einfluss des

Feuchtegehalts auf die Spaltzugfestigkeit bestätigt die Untersuchungen von [MITCHELL 1961]. Jedoch konnte durch [FROST 2012] ein weniger schlagartiges Versagen der wassergesättigten Proben nicht bestätigt werden.

**Tabelle 25:** Auflistung der Probekörper zur Untersuchung des Einflusses der Lagerungsbedingungen (Feuchte) auf die Spaltzugfestigkeit

Prüfserie		Lasteinleitung nach	Betonsorte	Schicht im Bohrkern	Feuchtezustand
Nr.	BAB				
PL 1	-	AL Sp-Beton	Laborbeton	1. Schicht	20 / 65
					Wasserlagerung
PL 4	A11		Unterbeton	2. Schicht	20 / 65
					Wasserlagerung
-	A14	einschichtiger Aufbau der Betondecke	1. Schicht	1. Schicht	20 / 65
				3. Schicht	
			1. Schicht	1. Schicht	Wasserlagerung
				3. Schicht	



**Abbildung 70:** Einfluss des Feuchtezustandes auf die Spaltzugfestigkeit ([FROST 2012] und eigene Werte)

**Tabelle 26:** Feuchtegehalt und zugehöriger Festigkeitsabfall der untersuchten Proben zum Einfluss der Lagerungsbedingungen (Feuchte)

Prüfserie		Schicht im Bohrkern	Feuchtezustand	Feuchtegehalt [M.-%]	Festigkeitsabfall [%]
Nr.	BAB				
PL 1	-	1. Schicht	20 °C / 65 rel. LF	1,1	-11,3
			Wasserlagerung		
PL 4	A11	2. Schicht	20 °C / 65 rel. LF	0,5	-7,9
			Wasserlagerung		
-	A14	1. Schicht	20 °C / 65 rel. LF	1,1	-12,7
			Wasserlagerung		
		3. Schicht	20 °C / 65 rel. LF	2,5	-15,5
			Wasserlagerung		

Die Ergebnisse der von [FROST 2012] durchgeführten photogrammetrischen Verformungsanalysen bestätigen für den Unterbeton die Annahme, dass bei wassergesättigten Probekörpern die Querdehnungen größer sind (siehe Abbildung 71).

Bei doppeltem Skalierungsfaktor sind in Abbildung 71 bei der wassergesättigten Probe größere und auf den Bereich des Trennrisses konzentrierte Querdehnungen erkennbar.

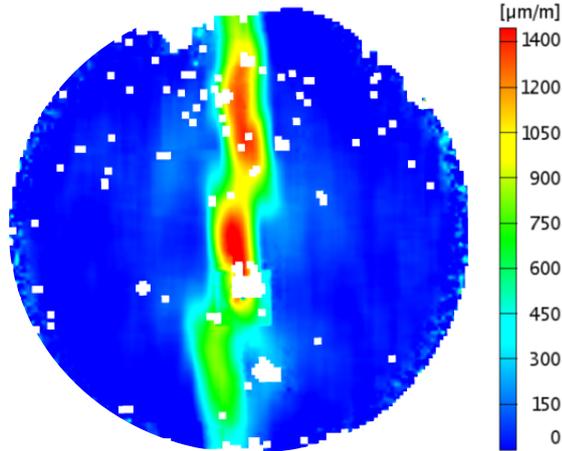
**a) Wasserlagerung**

4-198.1 – Unterbeton

Prüfung nach AL Sp-Beton

$f_{ct,sp} = 4,45 \text{ N/mm}^2$  mit 35,20 kN

Bild bei 34,53 kN  $\pm 98,1 \%$  der Bruchlast



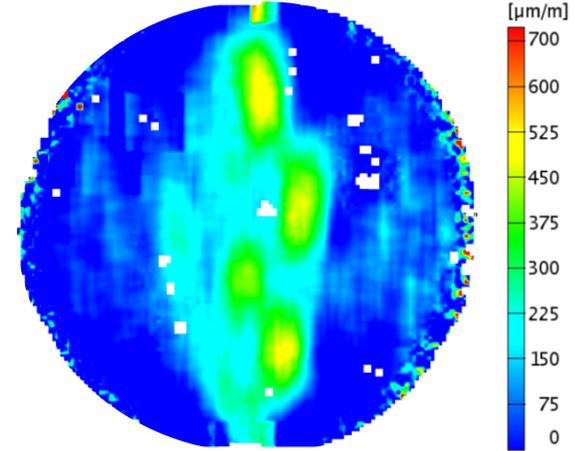
**b) 20 °C / 65 % rel. LF**

4-222.2 – Unterbeton

Prüfung nach AL Sp-Beton

$f_{ct,sp} = 5,37 \text{ N/mm}^2$  mit 41,99 kN

Bild bei 41,85 kN  $\pm 99,7 \%$  der Bruchlast



**Abbildung 71:** Gegenüberstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsanalyse bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen der Probekörper [FROST 2012]

## 11 Zusammenfassung

Mit einem breit aufgestellten Ringversuch wurden die statistischen Kennwerte zur Beurteilung der Präzision des Prüfverfahrens an Labor- und Bestandsbetonen unter Vergleich- und Wiederholbedingungen ermittelt. Die Grundlage hierfür bildete das FGSV-Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen [FGSV 2011]. Dieses sieht einerseits eine Auswertung mit dem klassischen sowie andererseits mit dem robusten Verfahren vor. Letzteres ist jedoch noch in der Entwurfsfassung und bedurfte einer Überprüfung.

Zur möglichst guten statistischen Absicherung nahmen an dem Ringversuch dreizehn erfahrene Prüfstellen teil. Das Spektrum der teilnehmenden Einrichtungen reichte dabei von Universitäten und Hochschulen über RAP Stra Prüfstellen, Prüfinstitute von Bauunternehmen bis zu Bundesanstalten. Die einzelnen Prüfstellen wurden im Vorfeld des Ringversuchs zur Analyse und Beseitigung möglicher Fehlerquellen einem Audit unterzogen.

Zur Abdeckung des vielschichtigen Einsatzes des Prüfverfahrens erfolgte der Ringversuch an acht Prüflosen. So berücksichtigen einerseits die Prüflosen 1 und 2 mit den im Transportbetonwerk hergestellten Betonzylindern die Erst-/ Eignungsprüfung und das darauf aufbauende Prüflos 3 mit Bohrkernen aus einer großtechnisch hergestellten Fahrbahnplatte mit gleicher Betonrezeptur die Übereinstimmungskontrolle bei Neubaumaßnahmen. Andererseits findet der Einsatz des Prüfverfahrens bei der Restsubstanzbewertung von Betonfahrbahnplatten, auch im Kontext der Erneuerung, bei den Prüflosen 4 bis 7 mit den Bohrkernen aus vier in Waschbetonbauweise ausgeführten Fahrbahnplatten Berücksichtigung. Das zusätzlich aufgenommene Prüflos 8 mit einem Labormörtel dient der Herausarbeitung des Materialeinflusses auf die Präzision der Spaltzug- und Druckfestigkeitsprüfung.

Um den Einfluss einer unterschiedlichen Probenvorbereitung auszuschließen erfolgte die Probenvorbereitung zentral durch die BAM. Zur Sicherstellung einheitlicher und vergleichbarer Prüfbedingungen wurde in enger Zusammenarbeit mit dem zuständigen Betreuungsausschuss eine Standardarbeitsanweisung zur Durchführung der Spaltzugprüfung erarbeitet. Die zusätzlichen Hinweise und Maßnahmen der Standardarbeitsanweisung, als Ergänzung der AL SP-Beton [ALSP 2006], haben bereits Eingang in das Normenwerk gefunden.

Bei der Plausibilitätsprüfung der an den einzelnen Prüfstellen gewonnenen prüflosspezifischen Ein-

zelwerte der Spaltzug- und Druckfestigkeit wurden sowohl Ausführungsfehler (Verwendung falscher Kalibrierprotokolle, unsachgemäße Bedienung des Spaltzugrahmens) als auch Übertragungs- und Tippfehler durch eine unzureichende Endkontrolle festgestellt.

Der sich anschließende Lilliefors-Test zeigt, dass die ermittelten Einzelwerte bis auf wenige Ausnahmen normalverteilt sind und damit die Voraussetzungen für die statistische Auswertung der Einzelwerte mit dem klassischen und robusten Verfahren gegeben sind.

Durch die grafische Darstellung der Mandel's h- und k-Werte wurden Auffälligkeiten hinsichtlich der Mittelwerte und Varianzen prüflosspezifisch für die einzelnen Prüfstellen visualisiert. Basierend darauf wurden anschließend mittels Grubbs- und Cochran-Test mehrere Ausreißer identifiziert. Nach Eliminierung der Ausreißer fand das klassische Auswerteverfahren zur Ermittlung der statistischen Kennwerte Anwendung. Zusätzlich wurde das robuste Verfahren nach dem Entwurf des FGSV Merkblattes [FGSV 2011] mit belassenen Ausreißern erprobt. Dabei wurde festgestellt, dass das Verfahren so nicht anwendbar war und zahlreicher Korrekturen bedurfte. Das resultierte insbesondere aus der Tatsache, dass die Nummerierung der Prüfstellen und die Reihenfolge der Einzelergebnisse innerhalb jeder Prüfstelle maßgebend die Ergebnisse bestimmten. Aus diesem Grund wurde basierend auf dem Aufsatz von [WILRICH 2012] ein modifiziertes Rechenverfahren angewandt. Einen zusammenfassenden Überblick über die mit beiden statistischen Verfahren gewonnenen Kennwerte gibt Tabelle 27.

Ausgehend vom Bewertungskriterium der [ALSP 2006], dass bei einer hochwertigen gleichmäßigen Betonherstellung und qualitätsgerechtem Einbau der Variationskoeffizient in der Regel einen Maximalwert von 0,1 annimmt, ist ersichtlich, dass in nahezu allen Anwendungsbereichen dieser Grenzwert unterschritten wird. Eine Ausnahme stellt jedoch die Druckfestigkeitsprüfung bei der Übereinstimmungskontrolle beim Prüflos 3 dar. Die hier festgestellten erhöhten Variationskoeffizienten sind auf Inhomogenitäten im Material infolge einer ungleichmäßigen Verdichtung der Versuchsplatte zurückzuführen. Das gilt in abgeschwächter Form auch für die bei diesem Prüflos ermittelten Variationskoeffizienten der Spaltzugfestigkeit. Berücksichtigt man diesen Umstand, so kann davon ausgegangen werden, dass der Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit beim Bestandsbeton tendenziell die größten Werte annimmt. Der Variationskoeffizient der Druckfes-

tigkeit hingegen erfährt primär durch deren stark erhöhte Mittelwerte infolge der Nacherhärtung eine beachtliche Reduzierung.

**Tabelle 27:** Zusammenfassung ausgewählter statistischer Kennwerte des Ringversuchs

Art der Prüfung / Prüfgegenstand		über Prüfstellen und Prüflose gemittelter Variationskoeffizient			
		Spaltzugfestigkeit		Druckfestigkeit	
		Wiederholbedingungen	Vergleichbedingungen	Wiederholbedingungen	Vergleichbedingungen
Erst-/ Eignungsprüfung	Labormörtel (PL8)	0,045 (0,052)	0,053 (0,062)	0,026 (0,029)	0,035 (0,042)
	Laborbeton (PL1-2)	0,062 (0,062)	0,064 (0,065)	0,065 (0,067)	0,066 (0,069)
Übereinstimmungskontrolle	Laborbeton (Versuchsplatte PL3)	0,079 (0,078)	0,087 (0,083)	0,105 (0,103)	0,110 (0,107)
		0,083 (0,077)	0,090 (0,082)		
Restsubstanzbewertung von Bestandsbetonen	Waschbeton (PL4-7)	0,082 (0,096)	0,095 (0,098)	-	-
	Unterbeton (PL4-7)	0,086 (0,084)	0,095 (0,089)	0,047 (0,047)	0,051 (0,05)
<p>Legende:</p> <p>Werte ohne Klammern: klassisches Auswerteverfahren Werte mit Klammern: robustes Auswerteverfahren</p> <p><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Minimalwerte bei Minimierung des Materialeinflusses</p> <p><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFDAB9; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Überschreitung des Grenzwertes von 0,1 durch ungleichmäßige Verdichtung der Versuchsplatte</p>					

Aufschlussreich ist aber auch eine vergleichende Betrachtung der Variationskoeffizienten von Labormörtel und Laborbeton bei der Erst-/ Eignungsprüfung. Hier zeigt sich, dass bei einer gleichmäßigen Verdichtung die Minimierung des Größtkorns zu einer beachtlichen Verringerung des Variationskoeffizienten führt. Dieser Trend ist offensichtlich bei der Druckfestigkeit stärker ausgeprägt als bei der Spaltzugfestigkeit.

Bezüglich der vergleichend mit klassischem und robustem Verfahren gewonnenen Kennwerte kann festgestellt werden, dass bei sehr homogenen Messergebnissen eines Prüfloses beide Verfahren nahezu die gleichen statistischen Kennwerte liefern. Für den Fall, dass Ausreißer eliminiert wurden, sind die Ergebnisse des robusten Verfahrens in der Regel etwas größer als die des klassischen Verfahrens.

Die bei beiden Verfahren erkennbare geringe Erhöhung des Variationskoeffizienten bei Vergleichbedingungen lässt auf einen geringen Einfluss des unterschiedlichen Personals und der verschiedenartigen Prüftechnik in den einzelnen Prüfstellen auf die Präzision des Prüfverfahrens schließen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Präzision der in der AL SP-Beton [ALSP 2006] beschriebenen Spaltzug- und Druckfestigkeitsprüfung mit einem Variationskoeffizien-

ten von weniger als 10 % unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen hinreichend genau ist.

Die begleitenden vertiefenden Untersuchungen zur Spaltzugprüfung mit innovativen Prüftechniken lieferten wertvolle Erkenntnisse zum besseren Verständnis des Bruchverhaltens von Fahrbahndeckenbetonen. So zeigte sich bei der simultanen Verfolgung der Schallemissionsaktivität, der Ultraschallgeschwindigkeit und der Querdehnung während des Lasteintrags, dass erst ab einer Belastung von ca. 93 % das Bruchversagen eingeleitet wird. Das lässt auf ein sprödes Materialversagen des Wasch- und Unterbetons schließen.

Die photogrammetrische Verformungsanalyse zeigt aber auch, dass der Einsatz von Hartfilzstreifen mit konkaver Lasteinleitung im Vergleich zur Anwendung von Hartfaserstreifen gleicher Breite mit planarer Lasteinleitung zu einer Verringerung der Höhe und der lokalen Konzentration der Querdehnungen führt. Dies erklärt das vermehrte Auftreten sekundärer Schubbrüche bei der Prüfung nach AL SP-Beton [ALSP 2006] im Bereich der Lasteinleitung. Weitergehende Untersuchungen hierzu sollten möglichst mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit einer hohen zeitlichen und örtlichen Auflösung erfolgen. Eine anschließende Auswertung der aufgenommenen Bruchsequenzen mit der Analysesoftware Aramis ermöglicht eine frühere Detektion der Rissinitiation und

somit eine bessere Bewertung der sekundären Schubbrüche.

Weiterhin wurde festgestellt, dass ein außermittiger Lasteintrag bei der Spaltzugprüfung zu einem unterschiedlichen Querdehnungen an den Stirnseiten der Betonscheibe führt. Dies lässt auf ein asymmetrisches Bruchverhalten schließen, welches durch ein einseitiges Versagen durch die Spaltwirkung der Lasteinleitungsschiene charakterisiert ist und zu einer Verminderung der Spaltzugfestigkeit führt. Zur Vermeidung derartiger Effekte wird eine Zentrierhilfe in Längsrichtung der Spaltzugprüfeinrichtung empfohlen.

Bezüglich des Einflusses des Feuchtegehalts ist festzustellen, dass sich tendenziell mit zunehmendem Feuchtegehalt die Spaltzugfestigkeit vermindert und die Querdehnung erhöht. So verminderte sich bei den hier untersuchten Betonen die Spaltzugfestigkeit um 7,9 bis 15,5 %. Dieser Umstand unterstreicht die Notwendigkeit der Präzisierung und Einhaltung der normativen Vorkonditionierung der Proben.

Die im Rahmen des Ringversuchs und der begleitenden Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse haben bereits partiell Eingang in die Normung gefunden. Dies betrifft insbesondere folgende in das Ergänzungsblatt der AL SP-Beton vom Oktober 2011 bereits aufgenommenen Präzisierungen:

- Herstellung und Lagerung der Laborprüfkörper:
  - ausschließliche Verwendung von Stahlschalungen
  - Belassen der Schalseite für Prüfung
  - Lagerung der Prüfkörper bei  $20 \pm 2$  °C unter Wasser
  - Definition der Massekonstanz
  
- Prüfung:
  - Notwendigkeit der visuellen Begutachtung der Prüfkörper hinsichtlich von Unregelmäßigkeiten (Risse, Abplatzungen, Verdichtungsmängel) vor der Prüfung
  - Verwendung einer kalibrierten Waage mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  g
  - Einsatz einer kalibrierten mechanischer Prüfmaschine der Genauigkeitsklasse 1 im erwarteten Messbereich

- ausschließliche Verwendung des Hartfilztyps der Härte H1 nach DIN 61200, dessen Abmessungen mindestens der Länge und Breite der Lasteinleitungsschienen entsprechen muss
- Sicherstellung einer parallelen Ausrichtung der Lasteinleitungsschienen vor und während der Prüfung
- Notwendigkeit einer Zentrierhilfe für die exakte zentrische Positionierung der Probekörper in Quer- und Längsrichtung

## Danksagung

Die Autoren möchten sich bei den nachfolgenden Personen und Firmen für ihre Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsprojektes bedanken:

- Herrn Dr. Deutler für seine Unterstützung bei der nach dem klassischen Verfahren durchgeführten statistischen Auswertung der Daten des Ringversuchs
- Allen am Projekt beteiligten Mitarbeitern der Fachbereiche 7.1 und 7.4 der BAM, insbesondere:
  - Herrn Pirskawetz für seine Unterstützung bei den mechanischen Prüfungen und den begleitenden zerstörungsfreien Prüfungen
  - Herrn Haamkens für die Beton- und Mörtelherstellung einschließlich der Bestimmung der zugehörigen Frischbetonkennwerte
  - Frau Maier und Herrn Machura für ihre Unterstützung beim Probenversand und der Dokumentation der Probekörper
- Firma Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co. KG, Standort Linthe/Berlin, für die Herstellung der Versuchsplatte auf dem Rastplatz „Kersdorfer See“

## Literaturverzeichnis

- [ALSP 2006]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn  
Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen – AL Sp-Beton, Ausgabe 2006
- [BONZEL 1964]: Bonzel, J.;  
Über die Spaltzugfestigkeit des Betons, *Beton-technische Berichte*, Düsseldorf, Beton-Verlag GmbH, 1964, pp. 59-96
- [CORD 1955]: Cordon, W. A. et al.;  
Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete, *Proceedings American Concrete Institute*, Vol. 52, No. 11, pp. 241-257
- [DIN ISO 5725-1]: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe (ISO 5725-1:1994)
- [FAIR 2002]: Fairbairn, E. M. R.; Ulm, F.-J.;  
A tribute to Fernando L. L. B. Carneiro (1913–2001) engineer and scientist who invented the Brazilian test, *Materials and Structures*, Vol. 35, No. 3, pp. 195-196
- [FGSV 2006]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss statistische Auswertung von Prüfergebnissen  
Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen – Teil 3: Planung, Organisation und Durchführung von Ringversuchen, Ausgabe 2006
- [FGSV 2011]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss statistische Auswertung von Prüfergebnissen  
Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen – Teil 4: Auswertung von Ringversuchen und Errechnung von Prüffehlern, Ausgabe 2011
- [Finck 2005]: Finck, F.;  
Untersuchung von Bruchprozessen in Beton mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, *Dissertation*, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005
- [FROST 2012]: Frost, D.;  
Analyse von Schädigungsprozessen statischer und dynamischer Spaltzugversuche unter Verwendung innovativer Prüftechnik, *Bachelorarbeit*, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Berlin, 2012
- [GRAF 1987]: Graf, U.; Henning, H.-J.; Stange, K.; Wilrich, P.-T.;  
Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik, Abschnitt 5.6.1, Seite 117, Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage 1987
- [GRAF 1998]: Graf, U.; Henning, H.-J.; Stange, K.; Wilrich, P.-T.;  
Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik, Springer-Verlag, Berlin, 2. korr. Nachdruck 1998
- [Lill 1967]: Lilliefors, H.W.;  
On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 62, No. 318, pp. 399-402
- [MALA 2010]: Malárics, V.;  
Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben, *Dissertation*, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2010
- [MITCHELL 1961]: Mitchell, N. B.;  
The indirect tension test for concrete, *Journal of Materials Research and Standards*, Vol. 1, No. 10, pp. 780-788
- [RSTO 2001]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss Dimensionierung  
Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen – RStO, Ausgabe 2001
- [RDO 2009]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss Dimensionierung  
Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen – RDO-Beton 09, Ausgabe 2009
- [ROCCO 1999]: Rocco, C.; Guinea, G. V.; Planas, J.; Elices, M.;  
Mechanisms of rupture in splitting tests, *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 1, pp. 52-60
- [WEINGART 1970] Weingart, W.;  
Spaltzugfestigkeit von Erdstabilisierungen, *Die Strasse*, Vol. 10, Nr. 9, pp. 493-500
- [WEISE 2006] Weise, F.; Pirskaewetz, S.; Müller, U.; Meng, B.;  
Charakterisierung der Schädigungsprozesse in Betonen mit innovativen Prüftechniken, *Beton*, Vol. 56, No. 6, pp. 268-275

[WILRICH 2012] Wilrich, P.:

Robust estimation of the variances from interlaboratory experiments with a heterogeneous material. Unveröffentlichter Aufsatz vom 02.09.2012

[WRIGHT 1955]: Wright, P. J. F.;

Comments on an Indirect Tensile Test on Concrete Cylinders, Magazine of Concrete Research, Vol. 7, No. 20, pp. 87-96

[ZTV 2007] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonbauweisen

Zusätzliche Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Trag-schichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton – ZTV Beton-StB 07, Ausgabe 2007

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**  
Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**  
Bräu, Vogt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**  
Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: **Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**  
Weise, Werner, Maier, Wilsch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: **Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze**  
Radenberg, Gehrke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2021

S 147: **Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST**  
Birle, Cudmani, Melsbach  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: **Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken**  
Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: **Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**  
Koukoulidou, Birle, Cudmani  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: **Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums**  
Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: **Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze**  
Klein, Gehlen, Kränkel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: **Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken**  
Mielich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: **Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ**  
Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: **Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)**

Büchler, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte**  
Villaret, Augter, Kayser, Riwe  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: **Asphaltoberbau und extreme Temperaturen**  
Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: **Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW**  
Schipek, Steffen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: **Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette**  
Cudmani, Henzinger, Birle, Barka  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: **Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren**  
Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: **Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton**  
Rigo, Unterderweide  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: **Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz**  
Kathmann, Schroeder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: **Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013**  
Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 163: **NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie**  
Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß, Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: **Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff**  
Cudmani, Heyer, Birle, Möller  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 165: **Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen**  
Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: **Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel**  
Demond, Reiche, Haas, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung**

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauasphalt**

Gehrke, Stephan, Weigel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten**

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens**

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

## 2022

**S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)**

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Tragsschichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO**

Wellner, Leischner, Spanier

€ 16,50

**S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise**

Villaret, Beckenbauer, Riwe, Tschernack

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalt**

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton**

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter**

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen**

Breitenbücher, Buckenhüskes, Radenberg, Twer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton**

Weise, Hüskes, Niedack-Nad

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.